R F 2701/A 6

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

76
1458

STUDII ȘI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

SERIA A

ENERGETICĂ GENERALĂ ȘI ELECTROENERGETICĂ

BUDAPEST MŰSZAKI EGYETEM KÖNYVTÁRA 1848

1963 JUL 20

1

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
St. cerc. energ. Vol. 13 Nr. 1-A p. 1—172 București 1963

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Seria A

ENERGETICĂ GENERALĂ ŞI ELECTROENERGETICĂ

Tomul XIII, nr. 1, 1963 **Apare de 4 ori pe an**

COMITETUL DE REDACŢIE

Acad. I. S. GHEORGHIU;
Acad. R. RĂDULEŢ,
— *redactor responsabil*;
Acad. A. AVRAMESCU,
Acad. M. BERCOVICI,
M. MARINESCU, membru corespondent al Academiei R.P.R.;
C. APETREI — *redactor responsabil adjunct*;
E. ARIE — *secretar ştiinţific*;
C. BĂLĂ;
CS. NAGY.

Redacţia: BUCUREŞTI, Şos. Vitan nr. 236

1989

F
2701/A

BUDAPESTI MŰSZAKI EGYETEM KÖZPONTI KÖNYVTÁRA 1848

Budapesti Műszaki Egyetem
Központi Könyvtár
580/1964

CONSIDERAȚII ASUPRA CONSUMULUI CASNIC DE ENERGIE ELECTRICĂ PENTRU ILUMINAT ÎN R.P.R.

DE

V. CARACUDOVICI, S. MANEA, CS. NAGY și G. PANAITESCU

621.311.153.2: 621.32: 644.3

Iluminatul electric, pentru crearea unor condiții de muncă și a unor condiții social-culturale de trai superioare, a cîștigat prioritate față de celelalte forme de iluminat, care chiar dacă în prezent mai persistă vor dispare în viitor. De aceea, în acest articol se va studia numai consumul de energie electrică necesar iluminatului gospodăriilor casnice, a ponderii lui în bilanțul electroenergetic și a influenței acestui consum asupra sistemului electroenergetic, în perioada actuală și în următorii 20 de ani.

Pentru studiul de față au fost utilizate date de perspectivă din Directivele Congresului al III-lea al P.M.R., rezultatele lucrărilor de prognoză făcute anterior în Institutul de energetică precum și date din literatura de specialitate. Ipotezele s-au făcut luînd în considerare tendințele dezvoltării societății noastre în condițiile desăvîrșirii construcției socialismului și a trecerii ulterioare la construirea comunismului.

În bilanțul electroenergetic ponderea consumului casnic de energie electrică are în general o tendință de creștere și ea variază pentru majoritatea țărilor între 5—30% [1]. Din consumul casnic de energie electrică iluminatul reprezintă 15—60% [2], [3], [4],[5], după cum în țara respectivă gradul de înzestrare cu aparate electrocasnice mari consumatoare de energie electrică, este mai mare sau mai mic.

Studiul consumului casnic de energie electrică este îngreunat prin faptul că unitățile la care se referă (gospodăriile casnice) sînt foarte numeroase și că el are un caracter aleator. Din aceste motive nu poate fi dirijat decît prin metode indirecte (tarifare, aprovizionarea pieții cu aparate electro-

casnice, condiţii de vînzare a aparatelor, politica preţurilor etc.) şi asupra lui nu există date statistice detaliate.

Greutatea în ceea ce priveşte datele statistice poate fi învinsă pe două căi practic accesibile: printr-o anchetă largă bazată pe o selecţie statistică judicioasă, sau prin crearea unui sistem de indici corespunzător unui sistem de ecuaţii al căror număr este mai mic decît necunoscutele. A doua metodă dă posibilitatea de a controla justeţea unor ipoteze făcute admiţînd pentru unele necunoscute anumite valori care trebuie să se încadreze în acest sistem.

Repetînd această operaţie pentru mai multe elemente se pot obţine prin aproximaţii succesive valori acceptabile.

În această lucrare accentul s-a pus pe latura metodică, avînd în vedere că rezultatele obţinute se pot îmbunătăţi pe calea unor anchete sau prin introducerea unor cifre mai exacte.

Consumul de energie electrică necesar pentru iluminat în mediul urban şi rural va fi tratat separat, avînd în vedere că în prezent există o diferenţă esenţială între ele şi ţinînd seama în acelaşi timp şi de tendinţa că în viitor această diferenţă esenţială tinde să dispară.

Pentru determinarea energiei consumate şi a puterii racordate în scopul iluminatului casnic se porneşte de la relaţia

$$P_R = (p_R \cdot \gamma \cdot p \cdot N \cdot s) + (p'_R \cdot \gamma' \cdot N' \cdot s')\ 10^{-3}\ \text{kW}, \qquad (1)$$

unde

P_R — este puterea racordată în gospodăriile casnice pentru iluminat în kW;

p_R — puterea racordată specifică, în W pe m² suprafaţa locuibilă;

γ — gradul de răspîndire al iluminatului electric;

N — numărul de locuitori;

s — suprafaţa locuibilă medie în m² pe cap de locuitor.

Mărimile notate cu ′ (prim) se referă la mediul rural iar cele fără, la mediul urban.

În scopul determinării puterii specifice racordate se utilizează metoda coeficienţilor [6]:

$$p_R = \frac{E\delta}{\eta\eta_u}\ \text{W/m}^2, \qquad (2)$$

unde

E — este iluminatul mediu la înălţimea suprafeţei de lucru în lm/m² sau în lx;

δ — coeficientul de siguranţă;

η — factorul de eficacitate luminoasă a sursei în lm/W;

η_u — coeficientul de utilizare a fluxului luminos.

Se va determina mărimea acestor indici pentru R.P.R. în perioada actuală cît şi evoluţia lor în timp pentru următorii 20 de ani. Trebuie arătat de la început că aceşti indici cît şi alte mărimi apreciate au un caracter global şi reprezintă cifre medii pe ansamblul ţării.

În prezent iluminatul electric în gospodăriile casnice, la noi cît şi în majoritatea covîrşitoare a ţărilor, se face aproape exclusiv cu lămpi

cu incandescență. Iluminatul fluorescent care are o eficacitate luminoasă de 3—4 ori mai mare nu a putut pătrunde în gospodăriile casnice deoarece are un efect stroboscopic pronunțat și un spectru sărac în lumină galbenă și roșie (fig. 1).

Aceste inconveniente se pot elimina prin fabricarea unor tuburi și corpuri de iluminat corespunzătoare, prin introducerea iluminatului combinat, a iluminatului semiindirect sau celui indirect.

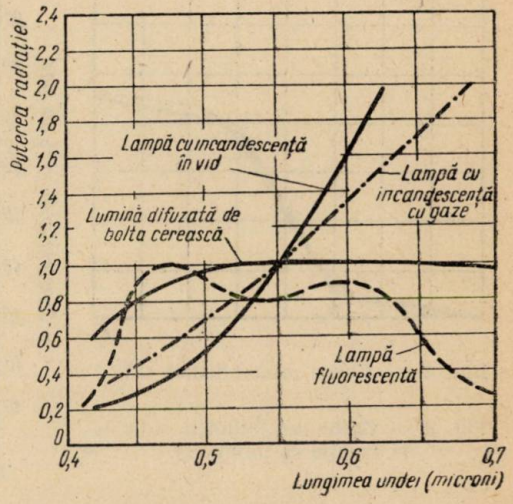


Fig. 1. — Curbele spectrale pentru diferite izvoare luminoase.

Trebuie arătat că din experiența de pînă acum cît și din literatură [14] a rezultat că introducerea iluminatului fluorescent nu atrage după sine o scădere corespunzătoare a puterii racordate ci se îmbunătățește iluminarea. Admițînd ipoteza — care din punct de vedere energetic se impune — că iluminatul fluorescent în următorii 10—20 ani va cîștiga un teren tot mai larg în gospodăriile casnice, la început la orașe și ulterior și la sate, se pot trage concluzii importante asupra felului cum vor evolua mărimile E și η. Pe această bază se poate admite că acești doi factori vor crește la început încet și apoi mai rapid o dată cu introducerea iluminatului fluorescent. Ulterior, acest ritm se va micșora din nou întrucît iluminatul se va apropia de un maxim care nu va fi depășit din motive fizice, biologice sau economice. Această evoluție se poate modela foarte bine cu o curbă probabilistică (curba S, fig. 2) de forma

$$Y = a\,[1-10^{-\alpha\,(t-t_0)^2}], \qquad (3)$$

unde

a — este valoarea limită a lui Y;
α — constantă;
t — anul calendaristic pentru care se determină Y;
t_0 — anul calendaristic de bază.

Pentru a putea calcula pe α și t_0 este nevoie să fie cunoscute două valori oarecare pentru Y și valoarea lui a. În general, se va căuta să se fixeze din datele existente valoarea lui Y_{1960}, să se aprecieze pe baza unor indicații de perspectivă Y_{1980} și să se stabilească limita a, din date fizice biologice etc.

Iluminarea medie E în lx se va determina pentru suprafața locuibilă urmînd ca apoi să se facă corecturile cuvenite în vederea luării în considerare a iluminării dependințelor și spațiilor auxiliare. S-a admis că în 1960 în țara noastră iluminarea medie, la înălțimea de lucru, pentru supra-

feţele locuibile a fost de 15 lucşi în mediul urban şi de 10 lucşi în mediul rural. Această ipoteză presupune că într-o cameră de 16 m² se instalează în becuri o putere de 80—90W la oraşe şi 50—70 W la sate. Pe baza recomandărilor normativului pentru iluminatul încăperilor în R.P.R. [7] se poate admite că în 1980 se va realiza o iluminare medie de 60 lucşi pentru suprafaţa

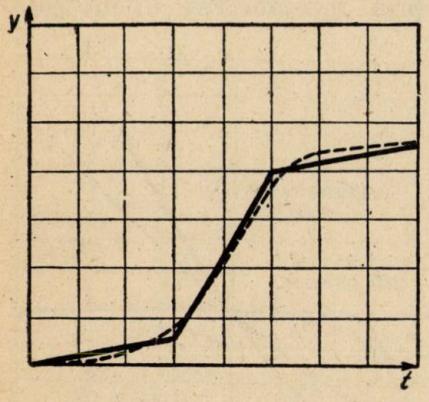


Fig. 2. — Curba probabilistică (S).

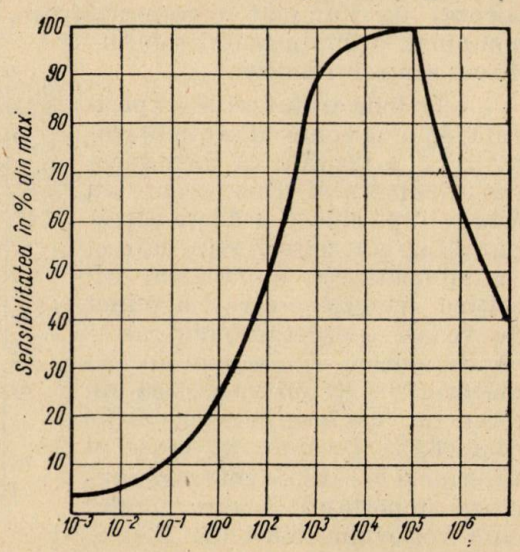


Fig. 3 — Curba sensibilităţii ochiului în funcţie de iluminare. →

locuibilă în mediul urban şi 50 lucşi în mediul rural. Pentru a s-a admis 10 000 lx.

Se poate pune problema dacă iluminarea a fost aleasă judicios pentru perioada de previziune. Din figura 3, rezultă că sensibilitatea ochiului pînă la 30 lucşi creşte foarte repede, la 60 lucşi aceasta ajunge la 80% din cea maximă iar la 1 000 lucşi la 98%.

Admiţînd pentru 1980 valoarea de 1 000 lucşi ar fi nevoie de o putere racordată în iluminat de aproximativ 16 000—18 000 MW şi o putere maximă absorbită de 4 000—5 000 MW ceea ce ar reprezenta 20—25% din puterea instalată.

Pornind de la aceste ipoteze relaţia (3) pentru iluminarea medie (E) în mediul urban rezultă :

$$E = 10^4 \, [1 - 10^{-1{,}63 \, (t-1940)^2 \cdot 10-6}].$$

Pentru eficacitatea luminoasă η a corpurilor de iluminat s-a considerat că, în mediul urban în 1960 cînd preponderează becuri de 60W, această valoare este de 11 lm/W, iar în 1980 din cauza introducerii pe scară mai largă a iluminatului fluorescent, care are o intensitate luminoasă mai mare, η ajunge la 20 lm/W. Pentru mediul rural, în aceiaşi ani s-a admis 10 lm/W respectiv 18 lm/W. Ca limită s-a luat randamentul maxim teoretic al corpului negru de 690 lm/W. Astfel a rezultat pentru mediul urban

$$\eta = 690 \, [1 - 10^{-2{,}2 \, (t-1904)^2 \cdot 10-6}].$$

În cazul mediului rural unde nu s-a prevăzut cel puțin pînă la data la care se referă studiul (1980) intervenția iluminatului fluorescent, variația în S pentru E și η a fost întocmită cu o variație liniară.

Factorul δ care reprezintă în formula (2) calitatea rețelei electrice de distribuție s-a admis că variază după o funcție de forma

$$\delta = a + \frac{A}{t - t_0}, \tag{4}$$

unde

a — este valoarea limită către care tinde δ;
A — o constantă;
t — anul calendaristic pentru care se face calculul;
t_0 — anul de bază.

S-a admis pe baza literaturii ca în 1960 δ va avea valoarea de 1,45 pentru mediul urban și 1,48 pentru mediul rural, iar în 1980 presupunîndu-se o îmbunătățire calitativă a rețelelor electrice valorile vor fi de 1,25 respectiv 1,30 și s-a obținut

$$\delta = 1 + \frac{11{,}25}{t - 1935},$$

$$\delta' = 1 + \frac{16{,}2}{t - 1926}.$$

Coeficientul de utilizare a fluxului luminos η_u depinde de tipul și randamentul armăturilor, de caracterul și culoarea suprafețelor pe care se reflectă lumina, de indicele încăperii (raportul între lățimea și înălțimea de suspensie a sursei de lumină) etc. Această mărime variază între 15—55% [6]. Progresul tehnic în construcția corpurilor de iluminat acționează în direcția creșterii acestui coeficient, iar tendința de a trece la iluminatul indirect, în direcția scăderii lui. Pe această bază s-a admis pentru mediul urban o valoare constantă pe întreaga perioadă și anume 0,3, iar pentru mediul rural o scădere de la 0,35 în 1960 la 0,30 în 1980.

Pînă acum s-a considerat numai iluminarea specifică necesară spațiului locuibil. Trebuie însă să se țină seama și de iluminarea dependințelor și în cazul blocurilor de locuit și a spațiilor comune.

Pentru raportul între suprafața locuibilă și suprafața de construcție s-a admis pentru mediul urban valoarea medie de 0,5 [8] iar pentru mediul rural, unde majoritatea locuințelor sînt case individuale, valoarea 0,45. Pe baza normativelor pentru iluminat, se poate aprecia că iluminarea încăperilor anexe este de circa 60% din cea a suprafețelor locuibile, în mediul urban și de circa 40 % în mediul rural. Pentru a lua în considerare și iluminatul local, valorile mai trebuie majorate cu circa 15% pentru mediul urban și circa 5% pentru mediul rural.

În consecință, valorile obținute pentru suprafața locuibilă se vor înmulți cu 1,75 pentru mediul urban și 1,55 pentru mediul rural. Aceste corecții au fost aplicate valorilor rezultate din relația (2) obținîndu-se astfel $p_{R\ \text{total}}$ (tabela 1).

Tabela 1

t	E lx	δ	η lm/W	η_u	p_R	p_R total W/m²
			Mediu urban			
1960	15,0	1,45	11,0	0,30	6,59	13,18
1970	33,7	1,32	15,1	0,30	9,89	19,79
1980	60,0	1,25	19,9	0,30	12,56	25,12
			Mediu rural			
1960	10	1,48	10	0,35	4,22	6,96
1970	30	1,36	14	0,32	9,10	15,02
1980	50	1,30	18	0,30	12,03	19,85

S-a admis ca gradul de înzestrare a gospodăriilor casnice cu lumină electrică γ se confundă cu gradul de electrificare al acestor gospodării, iluminatul fiind prima dintre utilizările casnice ale energiei electrice care vine în considerare.

Pentru anul 1960 pe baza datelor statistice s-a calculat γ pornind de la numărul abonaţilor rezultînd 34,6 % pentru ansamblul ţării (82,9 % la oraşe şi 11,6 % la sate).

Dinamica gradului de electrificare s-a stabilit pornind de la indicaţia dată în Directivele Congresului al III-lea al P.M.R. că în 1975 se va termina electrificarea tuturor localităţilor din ţară [9]. Electrificarea tuturor gospodăriilor din aceste localităţi va prezenta o oarecare întîrziere şi de aceea s-a admis ca în 1980 se va termina electrificarea gospodăriilor urbane şi 90 % din cele rurale.

Admiţînd şi pentru gradul de electrificare a variaţiei după o curbă probabilistică S, variaţie justificată prin faptul că în perioada imediat următoare electrificarea gospodăriilor va creşte mult, în special în mediul rural, s-a obţinut

$$\gamma = 100\ [1-10^{-0{,}68\ (t-1926)^2\cdot 10^{-3}}],$$

şi

$$\gamma' = 100\ [1-10^{-1{,}48\ (t-1954)^2\cdot 10^{-3}}].$$

Dinamica creşterii populaţiei (N) pentru perioada următoare a fost calculată admiţînd o creştere anuală de $12^0/_{00}$. Pentru a stabili structura populaţiei pe cele două medii — urban şi rural — s-a pornit de la date statistice [8] presupunînd că în 1980, 44 % din populaţie va trăi în mediu urban.

Determinarea suprafeţei locuibile pe cap de locuitor s a prezentat oarecare greutăţi întrucît datele statistice cuprind numai suprafeţele noi construite. Pentru determinarea dinamicii acestei mărimi s-a ţinut seama ca:

a) Suprafaţa locuibilă pe cap de locuitor chiar într-un viitor îndepărtat nu va depăşi 20 m², adică aproximativ o cameră de locuit pe persoană, avînd în vedere că cea mai mare parte a vieţii sociale se va desfăşura în cluburi, case de cultură etc.

b) În directivele Congresului al III-lea al P.M.R., se prevede că în mediul urban pînă în 1975 se va rezolva complet problema locuințelor și va crește și volumul construcțiilor la sate. Pe această bază s-a admis că în 1975 s va fi de 9 m² la orașe și de 7 m² la sate.

Printr-o serie de calcule s-a determinat suprafața specifică pentru anul 1960 și a rezultat 6,3 m²/loc. în mediul urban și 5 m²/loc. în mediul rural.

Pe baza datelor de mai sus și admițînd ca în viitor activitatea susținută de construcții va imprima și acestei mărimi o variație după curba S se obține

$$s = 20\,[1-10^{-46\,(t-1900)^2\cdot 10^{-6}}]$$

și

$$s' = 20\,[1-10^{-28\,(t-1894)^2\cdot 10^{-6}}].$$

Valorile obținute prin calcul pentru mărimile care intră în formula (1) sînt date în tabelele 2 și 3.

Tabela 2

Anul	Populația N 10^3 loc.	Suprafața locuibilă s m²/loc.	Grad de electrificare γ	Puterea racordată specifică pt. iluminat $p_{R\ total}$ W/m²	Puterea racordată totală pt. iluminat P_R kW
			Mediu urban		
1960	5 912	6,3	82,9	15,82	489 057
1970	7 630	8,1	95,0	20,94	1 229 526
1980	10 275	9,8	99,0	25,12	2 504 126
			Mediu rural		
1960	12 491	5,0	11,6	9,75	70 639
1970	13 105	6,3	58,2	15,21	730 825
1980	13 087	7,6	90,0	17,87	1 599 644

Tabela 3

Anul	P_R kW
1960	559 696
1970	1 960 351
1980	4 103 770

Calculînd pentru control puterea racordată în iluminat pe baza numărului de becuri puse în vînzare prin fondul pieții în 1959 și 1960 (un bec avînd durata de folosire circa 1 000 ore și fiind utilizat 450 ore pe an, durează deci aproximativ 2 ani) se obține o putere racordată de 552 000 kW foarte apropiată de valoarea din tabela 3.

Cunoscînd puterea racordată se poate calcula energia absorbită din reţea pentru iluminat cu formula

$$W = P_R T_R , \tag{5}$$

unde

W — este consumul anual de energie electrică pentru iluminatul gospodăriilor casnice în kWh;

P_R — puterea racordată în iluminatul electric al gospodăriilor casnice în kW;

T_R — orele de utilizare anuală a puterii racordate.

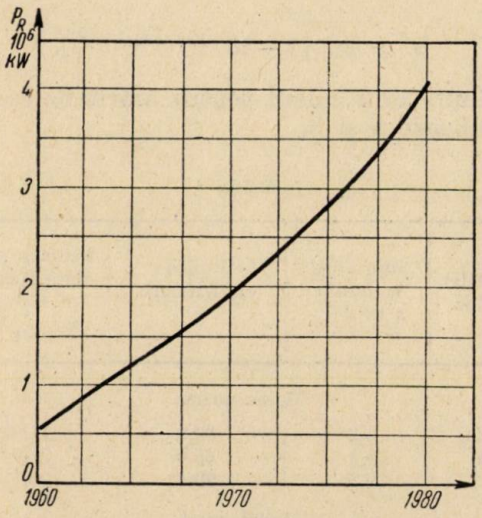


Fig. 4. — Puterea racordată pentru iluminatul în R.P.R. în perioada 1960—1980.

Determinarea orelor de utilizare T_R este o operaţie destul de dificilă întrucît nu există pentru ţara noastră o anchetă în acest domeniu, iar datele din literatură se pot utiliza numai cu rezerve, avînd în vedere condiţiile de trai şi geografice diferite.

Din acest motiv s-au aplicat metode indirecte şi anume:

a) Determinarea orelor necesare de iluminat pentru ţara noastră (fig. 5) şi înmulţirea lor cu un factor de utilizare a puterii racordate.

Din diagramă au rezultat 1 500 ore pe an. Admiţînd că în aceste ore puterea racordată se utilizează în proporţia de 25—30% se obţine

$$T_R = 375 - 450 \text{ h.}$$

b) O altă cale este calcularea acestor ore din consumul casnic de energie electrică pentru iluminat. Se admite că în condiţiile din ţara noas-

tră în consumul casnic de energie electrică deocamdată ponderea cea mai mare o are iluminatul electric şi anume 60 % se obţine

$$W_{1960} = 0{,}6 \; W_{t_{1960}} = 0{,}6 \cdot 433 \cdot 10^6 = 260 \cdot 10^6 \text{ kWh},$$

unde

W — este consumul casnic de energie electrică pentru iluminat în kWh;

W_t — consumul casnic total de energie electrică în kWh.

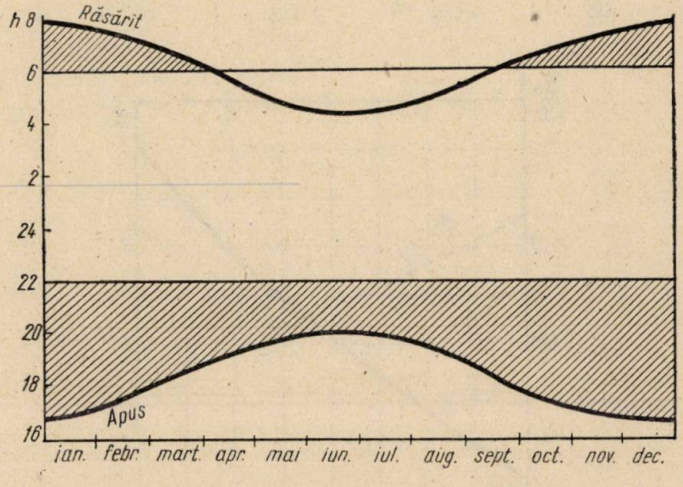


Fig. 5. — Orele necesare de iluminat pentru condiţiile din R.P.R.

Din tabela 2 rezultă că $P_R \cong 560.10^3$kW deci

$$T_{R_{1960}} = \frac{W_{1960}}{P_{R_{1960}}} = \frac{260 \cdot 10^6}{560 \cdot 10^3} = 464 \text{ ore.}$$

c) Dintr-o anchetă redusă, orientativă, care poate fixa doar ordinul de mărime a orelor de utilizare a rezultat că această valoare ar fi între 350—500 ore.

Trebuie menţionat că chiar acolo unde există o anchetă de consum casnic această mărime nefiind direct măsurată a fost determinată pe baza unor aprecieri.

Pe baza acestor date şi consideraţii s-a admis că orele de utilizare pentru R.P.R. în 1960 au fost de 450. Avînd în vedere că prin creşterea numărului de locuri de becuri într-o gospodărie, numărul orelor de utilizare are o tendinţă de scădere, s-a apreciat $T_{R_{1970}} = 425$ şi $T_{R_{1980}} = 400$ ore.

Pe baza mărimilor stabilite s-a putut face o prognoză a necesarului de energie electrică pentru iluminatul casnic (tabela 4, fig. 6).

Tabela 4

Anul	T_R	$P_{R_{10^3\,kW}}$	$W_{10^6 kWh}$	Prod. de en. electrică 10^9 kWh	% din producţia de energie electrică
1960	450	560	252	7,65	3,3
1970	425	1 960	833	35,00	2,4
1980	400	4 103	1 642	100,00	1,6

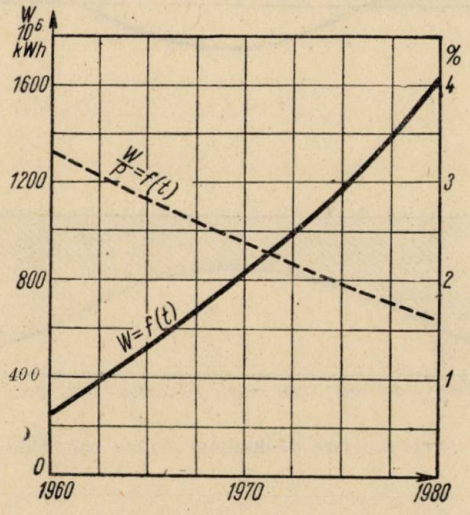


Fig. 6. — Consumul de energie electrică pentru iluminat şi ponderea lui în producţia totală de energie electrică, în R.P.R., în perioada 1960—1980.

Se vede că rolul acestui consum în bilanţul electroenergetic este relativ redus şi în permanentă scădere cu toată ipoteza unei creşteri de circa 8 ori în 20 de ani.

Avînd în vedere faptul că iluminatul casnic este un consumator important la vîrful de sarcină de seara se va cerceta şi contribuţia lui la acest vîrf.

Sarcina maximă pentru iluminat este dată de relaţia

$$P_{max} = g.k.P_R \; ; \qquad (6)$$

unde

P_{max} — este puterea maximă absorbită de instalaţiile de iluminat în kW;

g — factorul de simultaneitate în cadrul unei gospodării;

$$g = \frac{\text{puterea max. absorbită pentru iluminat de gospodărie}}{\text{puterea racordată pentru iluminat în gospodărie}};$$

k — factorul de diversitate;

$$k = \frac{\text{puterea max. absorbită din rețea de consum respectiv}}{\Sigma \text{ puterilor maxime în gospodării}}$$

Valoarea g este apreciată în literatură la 0,85 [6] iar în lucrarea de față pe baza unei anchete reduse, s-a aproximat la 0,75 (mediul rural avînd o pondere mai mică).

Mărimea k este o funcție a numărului gospodăriilor conectate la aceeași rețea. Admițînd o repartiție Gauss a puterilor maxime cerute de gospodăriile individuale în timpul vîrfului se obține următoarea legătură între k și numărul gospodăriilor racordate [10], [11], [12]:

$$k = \frac{p_0}{p_m} + \left(1 - \frac{p_0}{p_m}\right)\frac{1}{\sqrt{n}}, \tag{7}$$

unde

p_0 — este puterea medie cerută de un consumator casnic în timpul orelor de iluminat;

p_m — puterea maximă cerută de un consumator casnic în timpul orelor de iluminat;

n — numărul abonaților racordați la rețeaua respectivă.

Se observă că termenul al doilea din dreapta relației (7) la un număr de circa 1 000—2 000 de abonați devine neglijabil și în cazul acesta

$$k \cong \frac{p_0}{p_m}.$$

Raportul acesta se ia în general pentru tot consumul casnic între 0,1—0,3. Astfel în Suedia $k = 0{,}1-0{,}2$ [11], în S.U.A. $k = 0{,}25-0{,}56$ [13] și în R.F.G. $k = 0{,}24-0{,}26$ [12]. Pentru iluminat, acest raport se poate lua ceva mai mare. Pentru R.P.R. s-a apreciat că k are valoarea de 0,2—0,3, de unde

$$P_{max} = 0{,}2 \cdot 0{,}75 \cdot P_R \div 0{,}3 \cdot 0{,}75 \cdot P_R.$$

În tabela 5, sînt calculate valorile lui P_{max} precum și influența acestuia asupra puterii maxime totale absorbite.

Tabela 5

Anul	P_R MW	a	k	k	P_{max} MW	$P_{inst.}$ MW	P_{max}*) absorb. MW	$\frac{P_{max}}{P_{max}}$ absorb. %
1960	560				84—126	1 779	1 245	6,75—10,52
1970	1 960	0,75	0,2	0,3	294—441	7 000	4 900	6,00—9,00
1980	4 104				616—923	20 000	14 000	4,40—6,59

*) S a admis 0,7 P_i .

Se observă tendința de scădere în viitor a ponderii puterii maxime cerută de iluminatul casnic, dar această pondere rămîne totuşi mare şi în 1980 şi acest lucru nu poate fi considerat neglijabil din punct de vedere al investiţiilor în sistemul electroenergetic şi poate fi compensat numai prin măsuri de aplatizare a curbei de sarcină luate în alte ramuri.

Trecerea de la iluminatul cu bec incandescent la iluminatul fluorescent ar putea aduce economii importante de putere şi energie electrică. Aşa de exemplu, comparînd ipoteza că tot iluminatul casnic în 1980 se va face cu becuri incandecente cu ipoteza că 50 % din iluminatul casnic din mediul urban şi 25% din mediul rural se va face cu tuburi fluorescente şi numai restul cu becuri incandecente (iluminarea medie pentru ambele cazuri fiind aceeaşi — 50 — 60 lx) rezultă o economie de putere maximă absorbită din reţea de 195 — 293 MW şi o economie de energie electrică de 520.10^6 kWh sau o economie de circa 200 000 t.c.c. la consumul de energie primară.

Rezultă de aici că merită să fie luată în studiu problema introducerii masive a iluminatului fluorescent în gospodăriile casnice.

Din acest studiu rezultă faptul că atît pentru iluminatul casnic, cît şi pentru celelalte utilizări casnice, este necesară organizarea unei anchete judicioase care să conducă la fixarea mai precisă a indicilor utilizaţi în scopul stabilirii prognozei şi comparaţiilor de eficienţă economică a diferitelor soluţii adoptate pentru satisfacerea nevoilor de energie în acest domeniu.

БЫТОВОЙ РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСВЕЩЕНИЕ В РНР

РЕЗЮМЕ

В работе проводится прогноз необходимой мощности и потребления электроэнергии на бытовое освещение в РНР на основании показателей, собранных из статистических данных, литературных данных или теоретических выводов. В работе учитываются направления развития социальной жизни в нашей стране.

Путем последовательных приближений достигнуты приемлемые результаты. В выводах указывается необходимость опроса, касающегося бытового потребления электроэнергии для освещения, с целью увеличения точности определения показателей, и делаются предложения по введению флуоресцентного освещения.

BIBLIOGRAFIE

1. * * * *Bulletin annuel de statistiques de l'énergie électrique pour l'Europe, 1960.* Nations Unies, Genève, 1961.
2. F. RINGWALD, *Die Elektrifizierung des Haushaltes in der Schweiz.* Ö.Z.E., *9* (1959).
3. JACQUES DE FELICE, LOUIS PUISEUX, *Les applications domestiques de l'électricité en France.* Ö.Z.E., *9* (1959).

4. ALESSANDRO MONTAGNA, *Alcune note sulla elettrificazione delle abitazioni in Italia.* Ö.Z.E., *9* (1959).
5. H. GRIMM, *Die Elektrifizierung des Haushaltes in Österreich.* Ö.Z.E., *9* (1959).
6. E. O. STEINGAUZ, *Problemele alimentării cu energie în proiectarea oraşelor.* Ed. energetică de stat, 1954.
7. * * * *Normativ pentru proiectarea iluminatului artificial şi natural.* CSAC 215—55. Ed. de stat pentru arhitectură şi construcţii.
8. * * * *Anuarul statistic al R.P.R. pe anul 1961.* Direcţia centrală de statistică.
9. * * * *Directivele Congresului al III-lea al P.M.R. cu privire la planul de dezvoltare a economiei naţionale pe anii 1960—1965 şi pentru programul economic de perspectivă pe 15 ani.* Ed. politică, Bucureşti, 1960.
10. A. LANGNER, *Untersuchungen zum Elektroenergie und Leistungsbedarf der Haushalte u. Möglichkeiten einer breiteren Ausnützung der Elektroenergie im häuslichen Sektor.* Ed. Institut für Energetik, Leipzig, 1958.
11. S. RUSCK, *The simultaneous Demand in Distribution Network Supplying Domestic Consumers.* ASEA Journal, 59 (1956).
12. W. MOLLVITZ, *Die Abhängigkeit der Gruppenhöchstlast von der Einzelhöchstlast.* Elektrizitätswirtschaft, 11 (1956).
13. R. W. BAKER, *Now to Save Transformer Capacity.* Electrical World, 22 (1957).
14. NICOLAE GHEORGHIU, P. MILITARU, *Iluminatul electric.* Ed. energetică de stat, Bucureşti, 1952.

ASUPRA UNEI GENERALIZĂRI A NOŢIUNII DE REZONANŢĂ ŞI APLICAREA EI LA DEZVOLTAREA UNEI NOI TEHNICI DE PRODUCERE A ULTRASUNETELOR

DE

M. MARINESCU

MEMBRU CORESPONDENT AL ACADEMIEI R.P.R.

BUDAPESTI MUSZAKI EGYETEM KÖLPONTI KÖNYVTÁRA 1848

538.551.25 : 534.321.9

1. INTRODUCERE

Noţiunea de rezonanţă ocupă un loc atît de important în ştiinţă şi în aplicaţiile sale şi ca urmare este atît de profund studiată în toată literatura tehnică şi ştiinţifică de specialitate încît se poate pune cu adevărat întrebarea, dacă se mai poate aduce ceva nou, abordînd un astfel de subiect.

În general, vorbind de rezonanţă, ne referim la faptul că anumite sisteme, mecanice, electrice sau altele, reacţionează într-un mod deosebit de intens la aplicarea unei forţe sinusoidale.

Această asociaţie de idei între rezonanţă şi forţă sinusoidală este atît de puternic înrădăcinată în concepţia specialiştilor, încît, în orice aplicaţie în care este vorba de a obţine o amplificare destul de considerabilă, a unui anumit efect, prin rezonanţă, se caută ca această amplificare să fie realizată prin aplicarea unei forţe sinusoidale de o anumită frecvenţă. Tocmai această „limitare" a frînat în anumite domenii ale ştiinţei şi tehnicii, realizarea în sisteme complexe a unei rezonanţe în raport cu aplicarea unor forţe avînd alte forme, mai complexe decît forma armonică simplă şi aceasta cu scopul de a obţine efecte mai considerabile decît prin aplicarea forţei sinusoidale simple.

În particular aceasta este adevărat, de exemplu, în cazul generatoarelor ultrasonice cu magnetostricțiune, alimentate de un curent sinusoidal. Tocmai acest caz va fi analizat mai detaliat în acest articol. El va folosi de altfel ca exemplu concret de aplicație a generalizării pe care o dăm aici noțiunii de rezonanță.

2. ASUPRA ANUMITOR PRECIZĂRI, PRIVIND EFECTUL DE REZONANȚĂ. REZONANȚA ÎN RAPORT CU O ANUMITĂ FORMĂ ȘI FAZĂ A FORȚEI

Din punct de vedere matematic *rezonanța mecanică este* caracterizată prin condițiile pentru care expresia

$$\tau = \int_0^T F.v.\mathrm{d}t$$

are un maximum.

În această expresie, F este forța (sinusoidală) aplicată și v viteza și ea sinusoidală, obținută în cazul în care sistemul mecanic care intră în rezonanță are o masă m, o elasticitate c și o rezistență r.

Expresia lui τ astfel definită, ne dă lucrul mecanic pe care îl produce forța f, de amplitudine constantă și de frecvență variabilă, și care trece printr-un maxim la rezonanță—cînd frecvența forței este egală cu „frecvența proprie" a sistemului. În aceste condiții *viteza* este în fază cu forța.

O definiție analogă poate fi dată și în cazul în care forța este de origine electrică și sistemul, un circuit electric cu R, L și C.

În cele ce urmează va fi analizată căutarea maximului lui τ în raport cu forma și faza lui f în anumite sisteme electromecanice, ceea ce ne va permite obținerea datelor necesare pentru generalizarea noastră și în același timp va permite definirea unei rezonanțe în raport cu o anumită formă și fază a forței aplicate.

3. REZONANȚA LA IMPULS

Pentru a preciza ideile, să considerăm circuitul din figura 1 căruia i se aplică o f.e.m. $e(t)$, a cărei formă este aceea a unui tren de impulsuri de același semn, de perioadă T și de durată $\tau = T/4$ (fig. 2).

Presupunem că acest circuit constituie un modelaj electric *parțial* al unui anumit sistem *electromecanic* primitiv pentru care lucrul mecanic dezvoltat este un maximum cînd faza dintre curentul $i(t)$ (care modelează viteza și f.e.m. (care modelează forța) este aceea ilustrată în figura 3.

Se pune problema găsirii *condițiilor* pentru care această fază poate exista. Tocmai aceste condiții, dacă există, definesc *rezonanța de impuls* a sistemului primitiv.

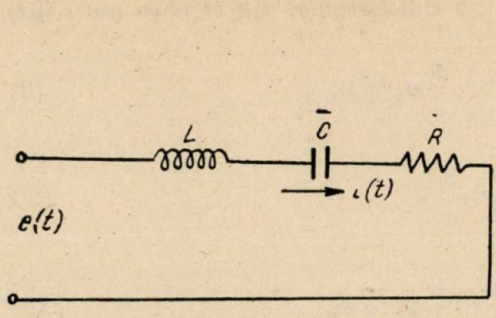


Fig. 1

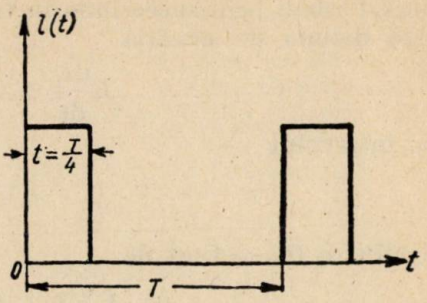


Fig. 2

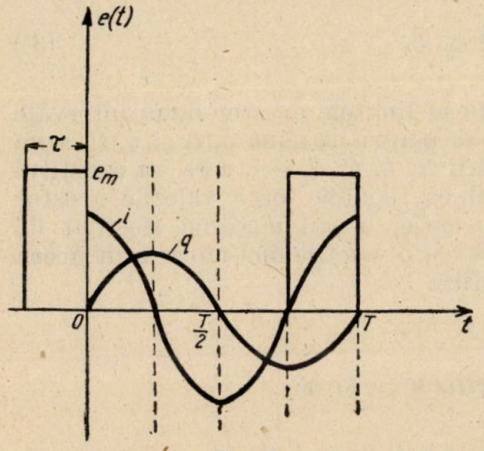


Fig. 3

Fig. 1. — Circuit electric rezonant care are aplicat la bornele de intrare o f.e.m. $e(t)$ periodică dar nesinusoidală.

Fig. 2. — Forma f.e.m. $e(t)$ aplicată circuitului din figura 1.

Fig. 3. — Curentul $i(t)$ sarcina $q(t)$, pe care f.e.m. $e(t)$ le produce în circuitul din figura 1 ; faza lui $i(t)$ și $q(t)$ în raport cu $e(t)$, ilustrată în figura 3, este cea care e necesară pentru realizarea „rezonanței la impuls" cînd $\tau = T/4$.

4. METODA DE TRATARE A PROBLEMEI

Curentul $i(t)$ produs în circuit este dat de ecuația :

$$L\frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{c}q = e(t), \tag{1}$$

unde

$q(t)$ — sarcina condensatorului.

Dezvoltînd $e(t)$ în serie (Fourier), se poate rezolva (1) în raport cu $i(t)$, după metoda clasică ; căutarea condițiilor pentru care are loc *rezonanța la impuls* luînd în considerare o astfel de soluție a lui $i(t)$, care se prezintă sub formă de serie infinită, prezintă, numeroase dificultăți.

De aceea, am imaginat o altă metodă care ne va permite să obținem direct ecuația *rezonanței la impuls*. Astfel am presupus curentul $i(t)$ ca

fiind format prin succesiune în timp, a doi curenți, dintre care unul $i_1(t)$ este definit de ecuația

$$L\frac{di_1}{dt} + Ri_1 + \frac{1}{c}q_1 = 0, \tag{2}$$

în intervalul

$$0 < t < \frac{3}{4}T \tag{2'}$$

și altul $i_2(t)$, definit de

$$L\frac{di_2}{dt} + Ri_2 + \frac{1}{c}q_2 = e_m \tag{3}$$

în intervalul

$$\frac{3T}{4} < t < T. \tag{3'}$$

Punînd condițiile de continuitate la limitele acestor două intervale pentru cei doi curenți $i_1(t)$ și $i_2(t)$ cît și pentru sarcina $q_1(t)$ și $q_2(t)$, vom obține o anumită relație între parametrii R, L, C, T și τ, care va constitui ecuația *rezonanței la impuls* în sensul că, pentru toate valorile acestor parametri care nu verifică această ecuație, lucrul mecanic efectuat de sistemul electromecanic primitiv, va avea o valoare mai mică decît aceea care corespunde valorilor care o verifică.

5. SOLUȚIA ECUAȚIILOR (2) ȘI (3)

Urmînd metoda expusă în paragraful 4, vom avea ca soluție generală a ecuației (2), expresia

$$0 < t < \frac{3T}{4}, \quad i_1(t) = i_{m1}\, e^{-\alpha t}.\cos(\omega_1 t - \varphi_1). \tag{4}$$

Tot astfel soluția completă a ecuației (3) are ca expresie

$$\frac{3T}{4} < t < T, \quad i_2(t) = i_{m2}\cos(\omega t - \varphi) + i'_{m1}\, e^{-\alpha t}\cos(\omega_1 t - \varphi'_1), \tag{5}$$

vom avea de asemenea

$$0 < t < \frac{3T}{4}, \quad q_1 = \int i_1\, dt = q_{m1}\, e^{-\alpha t}\sin(\omega_1 t - \varphi_1 - \theta), \tag{6}$$

$$\frac{3T}{4} < t < T, \quad q_2 = \int i_2 dt = q_{m2}\sin(\omega t - \varphi) + q'_{m1}\, e^{-\alpha t}\sin(\omega_1 t - \varphi'_1 - \theta), \tag{7}$$

unde

$$i_{m1} = \omega_0 q_{m1}; \quad i_{m2} = \omega q_{m2}; \quad i'_{m1} = \omega_0 q'_{m1}, \tag{8}$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}; \quad -\operatorname{tg}\theta = \alpha/\omega_1, \tag{9}$$

$$\alpha = R/2L; \quad \omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}, \tag{10}$$

și unde i_{m1}, i'_{m1}, i_{m2}, φ, φ_1, și φ'_1, sînt constante, pentru moment necunoscute, care trebuie determinate cu ajutorul condițiilor inițiale și de continuitate. De altfel, ecuația rezonanței este independentă de valoarea acestor constante.

Condițiile de continuitate. Scriind „continuitatea" curenților și a sarcinilor, în momentele ce limitează cele două intervale de timp, vom avea

$$\begin{aligned}
&\text{a)} \quad /i_1/_{t=0} = /i_2/_{t=T} = i_m, \\
&\text{b)} \quad /q_1/_{t=0} = /q_2/_{t=T} = 0, \\
&\text{c)} \quad /i_1/_{t=\frac{3T}{4}} = /i_2/_{t=\frac{3T}{4}} = 0, \\
&\text{d)} \quad /q_1/_{t=\frac{3T}{4}} = /q_2/_{t=\frac{3T}{4}} = -q_m .
\end{aligned} \tag{11}$$

Înlocuind în sistemul (11) curenții și sarcinile în momentele respective, prin valorile lor date de ecuațiile (4—7), vom obține ecuațiile:

$$\begin{aligned}
&\text{a)} \quad i_{m1}\cos\varphi_1 = i_{m2}\cos\varphi + i'_{m1}\, e^{-\alpha T}\cos(\omega_1 T - \varphi'_1) = i_m, \\
&\text{b)} \quad -q_{m1}\sin(\varphi_1 + \theta) = -q_{m2}\sin\varphi + q'_{m1}\, e^{-\alpha T}\sin(\omega_1 T - \varphi'_1 - \theta) = 0, \\
&\text{c)} \quad i_{m1}\, e^{-\frac{3}{4}\alpha T}\cos\left(\frac{3}{4}\omega_1 T - \varphi_1\right) = i_{m2}\cos\left(\frac{3}{4}\omega T - \varphi\right) + i'_{m1}\, e^{-\frac{3}{4}\alpha T} \\
&\cos\left(\frac{3}{4}\omega_1 T - \varphi'_1\right) = 0, \\
&\text{d)} \quad q_{m1}\, e^{-\frac{3}{4}\alpha T}\sin\left(\frac{3}{4}\omega_1 T - \varphi_1 - \theta\right) = q_{m2}\sin\left(\frac{3}{4}\omega T - \varphi\right) + q'_{m1} e^{-\frac{3}{4}\alpha T} \\
&\sin\left(\frac{3}{4}\omega_1 T - \varphi'_1 - \theta\right) = -q_m .
\end{aligned} \tag{12}$$

Ecuația rezonanței la impuls pentru: $t = T/4$

Din ecuațiile (12 b), (12 c) și (9), obținem eliminînd pe θ și φ_1 relația între parametri

$$x = -\frac{4}{3}\,\frac{\frac{3}{2}\cdot\frac{\pi}{k}}{\operatorname{tg}\left(\frac{3}{2}\cdot\frac{\pi}{k}\right)}, \tag{13}$$

unde

$$x = \alpha T; \qquad k = \frac{\omega}{\omega_1}.$$

Deci conform (13) vedem că

$$(2n+1)\frac{\pi}{2} < \frac{3}{2}\frac{\pi}{k} < (n+1)\pi, \qquad (n = 0,1,2 \ldots)$$

de unde

$$0 < k < 3,$$

Am trasat în figura 4, după relația (13), o familie de curbe $k(x)$ pentru n luat ca parametru. O analiză mai amănunțită a sistemului (12) ne duce la concluzia că din toate aceste curbe, numai curba pentru care

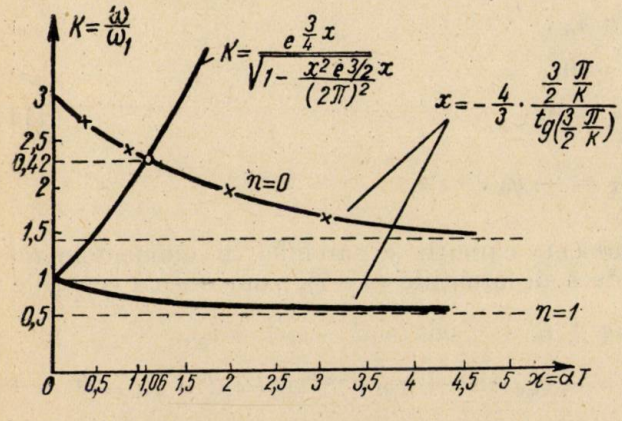


Fig. 4. — Familia curbelor „rezonanței la impuls" pentru diferiți parametri n, dînd relația între frecvența f.e.m. $e(t)$ și rezistența R a circuitului, necesară pentru ca să existe „rezonanța la impuls".

$n = 0$, corespunde rezonanței *la impuls*, fiind singura pentru care faza din figura 3 este respectată.

Vedem astfel că, pentru ca *rezonanța la impuls* să existe în condițiile specificate (privind faza și durata τ a impulsurilor) trebuie ca: 1° frecvența impulsurilor f.e.m. să fie cuprinsă între $\frac{3}{2}\omega_1$ și $3\omega_1$.

2°. Fiecărei valori a frecvenței, cuprinsă între aceste limite, îi corespunde o valoare a lui r pentru care există *rezonanța la impuls*.

În afara acestor limite, nu există *rezonanțe la impuls* oricare ar fi valoarea lui r. Vedem astfel apărînd deosebiri esențiale între *rezonanța la impuls* și rezonanța clasică, care are loc numai pentru frecvența proprie a circuitului, independent de valoarea rezistenței.

Se poate pune întrebarea ce se întîmplă în afara *rezonanței la impuls* dacă parametrii circuitului nu satisfac ecuația (13), pentru $n = 0$.

Pentru a răspunde la această întrebare, trebuie să amintim că circuitul din figura 1 reprezintă un modelaj electric (parțial) al unui sistem *electromecanic primitiv*.

În general, cînd condițiile *rezonanței la impuls* nu sînt satisfăcute, sistemul *primitiv* prezintă, în funcționarea sa un fenomen de *bătăi*

obținut prin interferența celor două frecvențe : frecvența ω a impulsurilor și frecvența proprie ω_1 a sistemului.

Efectul *rezonanței la impuls*, constă deci în intrarea sistemului, în sincronism pe frecvența impulsurilor.

Această sincronizare are loc în condițiile exprimate de ecuația (3) și pentru $n = 0$

Relația între i_m și q_m. Din ecuația (12) se poate obține imediat o relație între valorile maxime i_m și q_m ale curentului și ale sarcinei.

Într-adevăr din ecuația (12 a) și (11 d), obținem, prin diviziune, relația

$$i_m = \omega_0 e^{\frac{3}{4}x} \cdot q_m . \tag{14}$$

Pentru un curent sinusoidal avem relația

$$i_m = \omega . q_m ,$$

deci dacă

$$\omega = \omega_0 e^{\frac{3}{4}x} \tag{15}$$

relația între i_m și q_m este aceeași ca și pentru un curent sinusoidal.

Să căutăm să exprimăm (15) în funcție de k și x. Înlocuind ω prin valoarea sa în funcție de ω_1 și efectuînd anumite transformări, vom avea

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2 \cdot e^{3/2x}}{(2\pi)^2}}} . \tag{16}$$

Am trasat această ecuație $k(x)$ pe aceeași figură 4. Se vede astfel că ea taie familia de curbe ale *rezonanței la impuls* în două puncte de coordonate

$$k_0 = 2{,}42 ; \quad x_0 = 1{,}06 ; \quad k_1 = 1 ; \quad x_1 = 0.$$

Sînt punctele pentru care $i_m = \omega q_m$, ca și pentru o funcție sinusoidală.

Rezonanța la impuls pentru $\tau = (T/2 - 2\varepsilon)$

Presupunînd că f. e. m. $e(t)$, aplicată circuitului din figura 1, are forma unui teren de impulsuri rectangulare de același sens, de perioada T, de durata $\tau = (T/2 - 2\varepsilon)$ și că lucrul mecanic efectuat de sistemul electromecanic, modelat, este un maximum pentru cazul în care curentul produs are faza ilustrată în figura 5.

Obținem, urmînd aceeași metodă ca aceea întrebuințată pentru cazul în care : $\tau = \frac{T}{4}$, ca relație între parametri și în condițiile în care $2\varepsilon \ll \frac{T}{2}$, ecuația

$$RC = 4\varepsilon , \tag{17}$$

$$\text{cu } RC \ll 2\sqrt{L/C},$$

$$\text{sau } \pi\left(\frac{2\varepsilon}{T/2}\right) \ll \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right). \tag{17'}$$

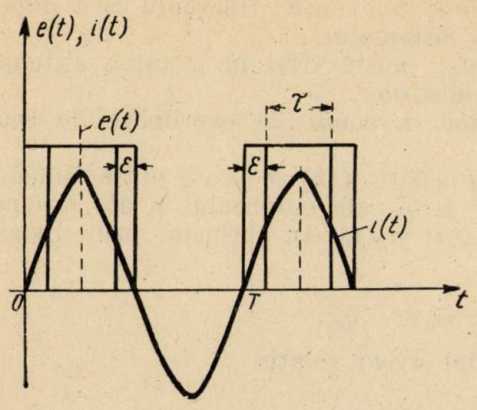


Fig. 5. — Faza între f.e.m. $e(t)$ și curentul $i(t)$ pentru ca să existe „rezonanța la impuls" pentru $\tau = \left(\frac{T}{2} - 2\varepsilon\right)$.

Se vede, conform relației (17) că pentru $\varepsilon = 0$, deci dacă $\tau = T/2$ *rezonanța la impuls* nu are loc de cît pentru

$$R = 0$$

și conform relației (17'), că dacă $\omega = \omega_0$, trebuie să avem

$$2\varepsilon/T/2 \ll 1/\pi.$$

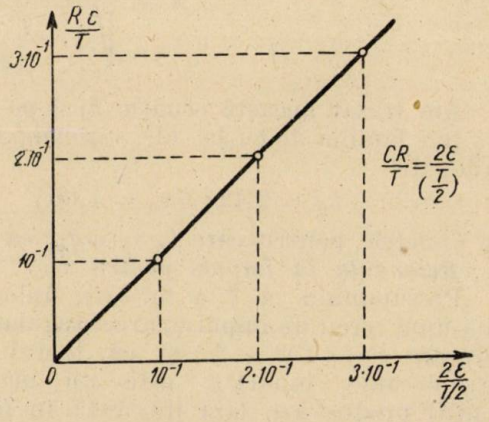


Fig. 6. — Relația între parametrii circuitului din fig. 1, pentru ca să existe „rezonanța la impuls" pentru $\tau = \left(\frac{T}{2} - 2\varepsilon\right)$.

Relația între R și C care menține defazajul curentului și pe ε, constanta, este o hiperbolă. Dacă C este constant, R este proporțional cu ε.

Remarcă. Este important de remarcat că ecuațiile (13) și (17) nu depind sensibil de forma impulsului (fie ea rectangulară, sinusoidală etc.) ci mai ales raportul τ/T, cît și de defazajul impus curentului.

Verificări experimentale

Am supus rezultatele teoriei noastre asupra *rezonanței la impuls* unei verificări experimentale efectuate asupra montajului din figura 7.

Un întrerupător cu camă antrenat de un motor închide periodic circuitul bateriei E, la intervale de timp a căror durată este reglabilă. Aceasta permitea obținerea în circuitul bateriei a unui curent pulsatoriu

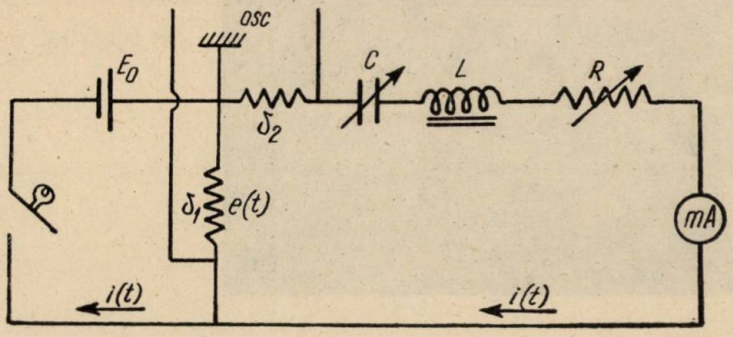


Fig. 7. — Montaj experimental pentru verificarea rezultatelor teoriei „rezonanței la impuls".

$f(t)$ de formă rectangulară, producînd la bornele rezistenței ρ_1 o cădere de tensiune $e(t) = \rho_1 j(t)$ de aceeași formă. Această tensiune este aplicată la intrarea unui circuit cu R, L, C, debitînd în acest circuit curentul $i(t)$. Forma curentului $i(t)$ și aceea a tensiunii $e(t)$, erau examinate la un osciloscop cu dublă pereche de plăci, ale căror tensiuni de intrare erau luate la bornele rezistențelor ρ_1 și ρ_2 și permitea obținerea pe același ecran, a celor două oscilograme ale lui $e(t)$ și $i(t)$, cu defazajul lor relativ. Variind C și R, se putea varia astfel, după dorință, defazajul între aceste două mărimi

Prima verificare. Reglînd contactul întrerupătorului la $\frac{\tau}{T} = \frac{1}{4}$, R și C, variau astfel încît defazajul între $e(t)$ și $i(t)$, astfel vizionat la osciloscop, să rămînă același ca în figura 2. După cum se vede din figura 4 valorile experimentale obținute pentru R și C se înscriu cu mare precizie pe curba teoretică a *rezonanței la impuls* pentru $n = 0$ (v. punctele acestei curbe).

Figura 8 ne arată fotografia imaginii oscilografice obținute în acest caz.

A doua verificare. Pentru $n = 1$, imagine oscilografică a lui $i(t)$ se deplasează în raport cu cea a lui $e(t)$, cu un sfert de perioadă înainte, vezi fotografia din figura 9.

Valorile experimentale ale lui R și C necesare pentru a menține acest defazaj constant se înscriu și ele cu mare precizie pe curba teoretică, avînd ca parametru $n = 1$ (vezi de asemenea punctele pe această curbă, fig. 4).

A treia verificare. Reglînd contactul întrerupătorului în montajul din figura 7, la $\tau = \left(\frac{T}{2} - 2\varepsilon\right)$ se obține imaginea osiclografică reproducînd curbele din figura 5 pentru valorile lui R și C, care verifică relația hiper-

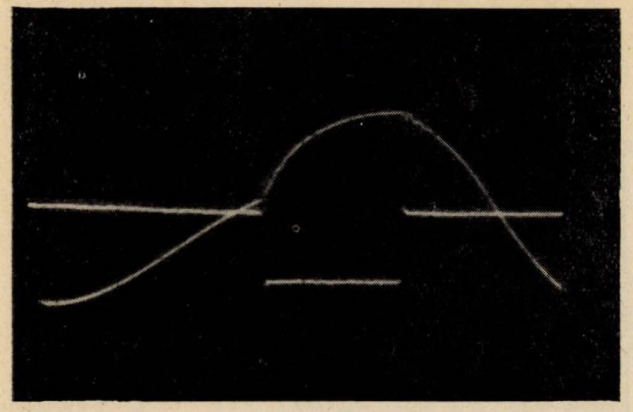


Fig. 8. — Oscilograma t.e.m. $e(t)$ și a curentului $i(t)$ în condițiile „rezonanței la impuls" pentru $\tau = \frac{T}{4}$ și $n = 0$ (circuit inductiv).

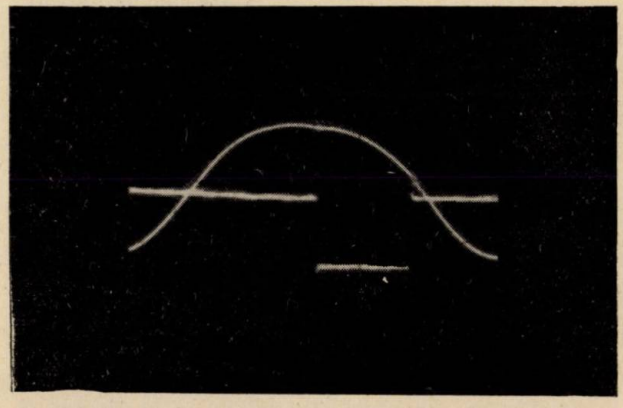


Fig. 9. — Oscilograma lui $e(t)$ și $i(t)$ în condițiile pentru care avem $n = 1$ (circuit capacitativ).

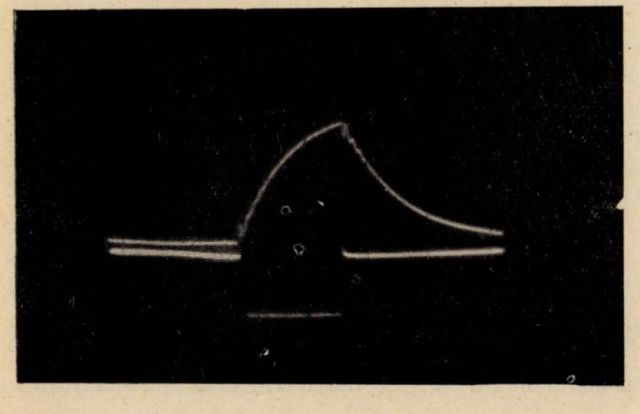


Fig. 10. — Oscilograma lui $e(t)$ și $i(t)$ pentru cazul unui circuit aperiodic (R și L) cînd $\tau = T/4$. „Rezonanța la impuls" are loc cînd cele două arii, dintre care una este cuprinsă între porțiunea ascendentă a curbei reprezentînd pe $i(t)$ și axa absciselor și alta este cuprinsă între porțiunea descrescătoare a lui $i(t)$ și aceeași axă, sînt egale. Aceasta are loc pentru $\tau = 1{,}61 \frac{L}{R} = \frac{T}{4}$.

bolică (17) și dacă în particular C este constant, R este proporțional cu ε, așa după cum se vede pe curba din figura 6, trasată după datele experimentale.

A patra verificare. Circuit aperiodic. Punînd capacitatea în scurt-circuit și reglînd contactul întrerupătorului la $\tau/T = 1/4$ s-a obținut pentru $i(t)$ oscilograma din figura 10, care reprezintă o succesiune a două curbe exponențiale, prevăzute de teorie.

Pentru cazul în care $\tau = 1{,}61\ L/R$, se obține egalitatea celor două arii dintre care una este cuprinsă între curba ascendentă și axa timpului și cealaltă între curba descrescătoare și aceiași axă, proprietate prevăzută de asemenea de teoria noastră (vezi observația).

Observație. Teoria *rezonanței la impuls* în circuitele aperiodice (cu L și R) a fost complet pusă la punct și va fi publicată ulterior.

EFECTUL MAGNETOSTRICȚIUNII, REZONANȚA CLASICĂ ȘI *REZONANȚA LA IMPULS*

După cum am arătat la începutul acestui articol, în virtutea concepției clasice privind *rezonanța* s-a încercat să se amplifice prin rezonanță efectul de magnetostricțiune, prin aplicarea unei forțe sinusoidale.

Cum pe de altă parte, relația între forța magnetostrictivă f și inducția B nu este o relație liniară ci o relație patratică:

$$f = k.B^2$$

pentru a obține o forță sinusoidală plecînd de la o inducție sinusoidală trebuie *liniarizată* această relație, ceea ce se obține prin suprapunerea unei inducții constante B_0, ceea ce ne dă

$$f_0 + f = k(B_0 + B)^2 = k B_0^2 + 2k B_0 B + h B^2,$$

de unde relația liniară dorită

$$f = 2h B_0 B = KB$$

Deci dacă B este sinusoidal, f va fi și ea sonusoidală. Tocmai această forță sinusoidală de aceeași frecvență cu B, aplicată generatorului magnetostrictiv *acordat* pentru această frecvență, produce rezonanța clasică dorită.

Procedînd astfel, nu se obține decît o fracțiune din energia pe care efectul magnetostrictiv poate să o producă în cele mai bune condiții de utilizare.

Într-adevăr, dacă examinăm planul fazelor (B, H), ciclul de histerezis magnetostrictiv, dinamic, constatăm pe figura 11 că acest ciclu, în cazul unei polarizări (B_0, H_0) este un ciclu *minor* a cărui arie nu este decît o fracțiune a aceleia pe care ar avea-o un ciclu de histerezis magnetostrictiv static — obținut fără polarizare și pentru aceleași valori maxime B_m și H_m.

Un astfel de ciclu de histerezis de magnetostricțiune statică se obține cu ajutorul unei tije de nichel, înconjurată de o înfășurare traversată de un curent, utilizînd succesiv efectul Villari și efectul Joule, primul

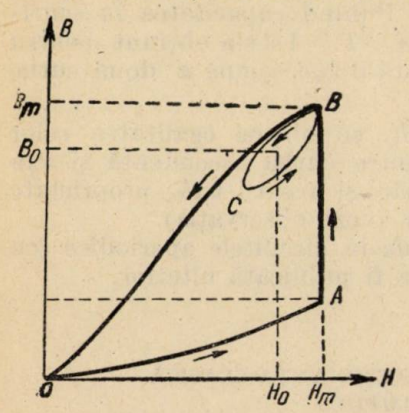


Fig. 11. — *CB*, ciclul dinamic de „histerezis de magnetostricțiune" în cazul unei polarizări (H_0, B_0), și în condițiile rezonanței clasice. *OABO*, ciclul static de „histerezis de magnetostricțiune" obținut prin succesiunea efectelor lui Villari și a lui Joule.

obținut variind încet curentul de la 0 pînă la valoarea maximă I_m, menținînd în acest timp constantă lungimea tijei, apoi menținînd constant curentul și lăsînd bara să se scurteze încet, sub acțiunea efectului Joule.

În sfîrșit, făcînd din nou să varieze încet, curentul de la I_m pînă la zero, menținînd constantă lungimea (scurtată) tijei (efectul Villari), se parcurge ciclul *OABO*, a cărui arie este egală cu lucrul mecanic elastic

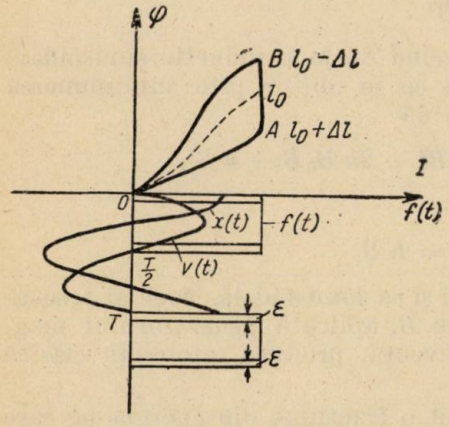


Fig. 12. — *OABO*, ciclul dinamic de „histerezis de magnetostricțiune" obținut prin „rezonanță la impuls" pentru $\tau = \left(\frac{T}{2} - 2\varepsilon\right)$, cînd relația între parametrii circuitului este dată de

$$\frac{RC}{T} = \frac{2\varepsilon}{T/2} \ll \frac{\omega}{\pi\omega_1}.$$

Aria acestui ciclu este egală cu aceea a ciclului static *OABO* din figura 11.

specific de compresiune magnetostrictivă a tijei. Efectul de deformare elastică este totuși foarte mic, din cauza valorii ridicare a rigidității materialului (nichel). Același ciclu poate fi descris în stare dinamică, făcînd să circule în înfășurare un curent pulsatoriu de același sens, de formă rectangulară, cu pulsații de durată cel mult egală cu ceea a intervalelor; utilizînd efectul de *rezonanță la impuls*, se poate obține de astă dată un efect de deformație mult mai considerabil — dacă condițiile de apariție a acestei forme de rezonanță sînt satisfăcute.

În acest caz, aria ciclului de histerezis static de magnetostricțiune reprezintă travaliul consumat în rezistența utilă de radiație a generatorului magnetostrictiv — travaliu care este prin urmare mult mai mare decît acela obținut prin parcurgerea unui ciclu, *minor* cu ajutorul rezonanței clasice.

Vom arăta acum că într-adevăr realizînd între forță și mișcare condițiile cerute de rezonanța la impuls, se parcurge în planul fazelor ciclul de histerezis static $OABO$.

Forța de magnetostricțiune care acționează asupra tijei în lungul axei sale — este și ea de aceeași formă ca și curentul (deoarece avem $f = k.I^2$). Am reprezentat în figura 12, această forță (f, t) pentru două impulsuri succesive.

Deoarece trebuie realizate condițiile *rezonanței la impuls* va trebui ca oscilațiile $x(t)$ ale lungimii tijei și viteza $v(t)$ a acestor oscilații, să fie cele ilustrate în aceeași figură.

Alungirile tijei sînt considerate cantități pozitive, iar scurtările sînt considerate cantități negative.

De asemenea, vitezele sînt pozitive cînd extremitățile tijei se apropie una de alta, așa cum se vede pe această figură. Vom raționa pe cazul limită, cînd $\varepsilon = 0$. Concluziile rămîn aceleași și pentru cazul cînd $\varepsilon \neq 0$, așa după cum este ușor să ne convingem.

În momentul $\tau = 0$, forța crește brusc, atunci cînd viteza tijei este nulă și lungimea ei este maximă.

În planul (Φ, I) fluxul crește urmînd OA, cînd lungimea barei rămîne constantă $(l = l_0 + \Delta l)$; imediat după $t = 0$, forța devenind constantă ca și curentul, tija este cea care se scurtează de la $(l_0 + \Delta l)$ la l_0 și viteza crește de la zero la maximum; curentul rămânînd constant pînă la $\frac{T}{2}$, tija continuă să se scurteze de la l_0, la $(l_0 - \Delta l)$, cînd viteza se anulează. În timpul acestei semiperioade, de la 0 la $\frac{T}{2}$ în planul (Φ, I) fluxul crește urmînd AB, la curent constant. În sfîrșit, în același moment $t = \frac{T}{2}$ curentul și deci forța se anulează brusc, viteza fiind nulă.

În planul (Φ, I) fluxul scade de la B la O, urmînd curba BO — lungimea tijei fiind constantă.

De la $\frac{T}{2}$ pînă la T, curentul și forța sînt nule, tija se destinde liber, pentru ca să revină în momentul $t = T$ la lungimea inițială $(l_0 + \Delta l)$.

Pornind de la $t = T$ mai departe, procesul se repetă. Frecvența mișcării, este astfel egală cu ceea a curentului.

În intervalul $\frac{T}{2} < t < T$, în planul (Φ, I), curentul fiind nul, fluxul este și el nul, și rămîne în 0.

La fiecare impuls pozitiv al curentului, durînd o semiperioadă, forța efectuează un lucru mecanic echivalent cu aria ciclului de histerezis de magnetostricțiune.

Ecuația (17) a *rezonanței la impuls* pentru $\left(\frac{T}{2} - 2\varepsilon\right)$ ne dă valorile lui T, a lui ε și a parametrilor proprii α și ω_0 ai tijei, necesari pentru realizarea unei astfel de rezonanțe (v. ecuațiile (17) și (17')).

Observație. Pentru orce alt defazaj dintre $v(t)$ și $f(t)$ lucru mecanic este mai mic, aria ciclului respectiv se înscrie în interiorul ciclului limită *OABO*. Ne putem da bine seama de acesta, avînd în vadere faptul că forțele de magnetostricțiune sînt (pentru nichel) forțe de compresiune.

CONCLUZII

Prin aplicarea teoriei *rezonanței la impuls* verificată prin experiență, asupre modelelor electrice, am ajuns să demonstrăm posibilitatea de a mării în mod sensibil, energia radiată de un generator de ultrasunete, magnetostrictiv, cu regim de funcționare periodică. Dacă într-adevăr în loc să alimentăm circuitul electric al unui asemenea generator, ca de obicei printr-un curent sinusoidal suprapus peste un curent continuu de polarizare, de valoare mult mai mare, îl alimentăm printr-un curent pulsatoriu, de perioada T, cu pulsații rectangulare de același sens și de durată, egală cu $\left(\frac{T}{2} - 2\varepsilon\right)$, valoarea maximă a pulsațiilor nedepășind suma curenților continuu și sinusoidal suprapuși, lucru menanic efectuat în acest ultim caz este echivalent cu aria unui ciclu de histerezis, static, în timp ce în primul caz el n-ar fi reprezentat decît aria unui ciclu *minor*. Teoria *rezonanței la impuls* a cărei aplicație în domeniul generatoarelor magnetostrictive a fost dată aci cu titlul de exemplu, își găsește aplicația în multe alte domenii [1] [2].

SUR UNE GÉNÉRALISATION DE LA NOTION DE RÉSONANCE ET SON APPLICATION AU DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE TECHNIQUE POUR LA PRODUCTION DES ULTRA-SONS

RÉSUMÉ

Après avoir analysé la réponse des circuits résonnants, dans les systèmes complexes, à l'application d'une force sous forme d'impulsions ayant une phase bien déterminée par rapport au courant, l'auteur établit les conditions d'une nouvelle forme de résonance, qu'il appelle « résonance à l'impulsion ». Ces conditions diffèrent radicalement des conditions

connues de la résonance classique. Les conclusions qui en découlent sont soumises à une vérification expérimentale sur un modèle électrique.

Comme exemple, l'auteur applique les conclusions de cette théorie aux générateurs d'ultra-sons à magnétostriction et obtient ainsi une augmentation sensible de la puissance développée par ces générateurs à «résonance à l'impulsion», par rapport à la puissance que les mêmes générateurs pourraient produire dans les conditions de la résonance classique.

BIBLIOGRAFIE

1. M. MARINESCU, *Sur un nouveau moteur électrique à mouvement alternatif*. R.G.E., sept. (1961).
2. M. MARINESCU, I. VRANCEA, *Căi noi de dezvoltare a mașinilor cu reluctanță variabilă și aplicarea la realizarea unui nou tip de motor electric cu mișcare alternativă*. Standardizarea, *6 — 7* (1962).

STUDIU EXPERIMENTAL AL FLUCTUAȚIILOR SARCINII CU APLICAȚII LA CALCULUL FLUCTUAȚIILOR PUTERII DE SCHIMB ȘI LA DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A CARACTERISTICILOR DINAMICE ALE UNUI SISTEM ELECTROENERGETIC

DE

ECATERINA ARIE

621.311.153.2.016.352

1. INTRODUCERE

Sistemul de reglaj al frecvenței în cazul sistemelor electroenergetice izolate, respectiv sistemul de reglaj frecvență putere în cazul sistemelor interconectate, trebuie să asigure calitatea reglajului frecvenței și totodată să limiteze fluctuațiile de putere pe liniile de interconexiune și eventual pe anumite linii cu capacitate redusă de transport,precum și încărcarea și viteza de încărcare a grupurilor generatoare. În acest scop comportarea la transfer a sistemelor de reglaj trebuie să fie adaptată la caracteristicile perturbațiilor și la caracteristicile ansamblului care compune sistemul electroenergetic.

Atît perturbațiile accidentale, cu caracter de avarie, cît și perturbațiile datorită variației continue a cererii consumatorilor în regim normal de exploatare, sînt cauzate de fenomene întîmplătoare, astfel că se pretează la studiul statistic.

Combinînd regimurile și avariile posibile, se pot selecționa cazurile care conduc la pierderea stabilității sistemului sau la funcționarea pro-

tecției de suprasarcină, sau de frecvență minimă. Date statistice de exploatare permit determinarea probabilității de apariție simultană a condițiilor selecționate ca periculoase.

Această probabilitate poate fi folosită drept criteriu pentru compararea variantelor, fie direct, fie prin utilizarea ei la calculul daunelor probabile.

În intervalul dintre momentele de intervenție a personalului de exploatare, sarcina rezultantă datorită tuturor consumatorilor din sistem, variază statistic.

Aceste variații statistice ale sarcinii perturbă funcționarea sistemului, avînd ca efect variații statistice ale parametrilor de regim și ale puterilor ce circulă între elementele sistemului.

Pentru descrierea variațiilor statistice ale sarcinii, a fost propus un model probabilistic simplu [1], [2]: se consideră consumatorul complex format din n consumatori individuali ce se conectează succesiv în momente t_j repartizate la întîmplare după un proces de tip Poisson. În cazul particular în care pentru grupa k de consumatori, puterea absorbită este egală cu s_k, cu probabilitatea p_k, legea de probabilitate a duratei de conectare este exponențială, iar durata medie de conectare este T_k, rezultă funcția de autocorelație a puterii cerute de un consumator complex:

$$\mu_s(\tau) = n \sum_k p_k s_k^2 T_k e^{-\frac{\tau}{T_k}},$$

iar densitatea spectrală

$$f_s(\nu) = \frac{n}{\pi} \sum p_k \frac{s_k^2 T_k}{1 + T_k^2 \nu^2}.$$

Verificări indirecte asupra acestei ipoteze, făcute de alții [3], [4] și de noi [5], prin determinarea din înregistrarea fluctuațiilor frecvenței a funcției de autocorelație a acesteia au arătat prezența pe lîngă termenii exponențiali, corespunzători funcției statistice derivate dintr-un proces de tip Poisson și a unor termeni periodici sau periodici amortizați.

Pentru explicarea prezenței acestor termeni am apelat la un alt model probabilistic, pe care l-am considerat mai potrivit pentru majoritatea consumatorilor din industrie și tracțiune unde motoarele au o durată mare de conectare, variază însă ritmic gradul lor de încărcare [5].

Aceste variații ritmice cu perioade de ordinul minutelor sau secundelor, au loc în general cu viteze și amplitudini repartizate în jurul unei valori medii pentru un același consumator în diferite momente, sau pentru consumatori din aceeași categorie.

Datorită faptului că viteza de lucru se modifică în general datorită intervenției omului sau altor factori externi, variații finite ale vitezei de lucru nu pot avea loc în intervale de timp oricît de mici. Pornind de la aceste considerente s-a adoptat pentru consumatorii cu variație ritmică a sarcinii, în completarea modelului descris anterior, un al doilea model, pentru care s-au admis următoarele ipoteze:

Fiecare consumator elementar absoarbe o putere variabilă descrisă prin funcția statistică

$$s_k(t) = a_{kt} \cos \varphi_{kt},$$

unde atît a_{kt} cît și φ_{kt} sînt variabile statistice. Viteza de variație a variabilei φ_{kt} este ω, iar ω este o variabilă statistică cu media ω_{0k} și dispersia $\sigma_{\omega k}$, cu variație discontinuă, fiind constantă în anumite intervale de timp de lungime medie τ_0.

Funcția de autocorelație care rezultă este

$$\mu_s(t_1 t_2) = \sum A_k e^{-\alpha_k \tau} \cos \omega_{0k} \tau,$$

unde (1)

$$A_k = \frac{N_k \bar{a}_{kt}^2}{2} \qquad \alpha_k = \frac{\sigma_\omega^2 \tau_0}{2}.$$

În relația (1), N_k — numărul consumatorilor elementari de categoria k este proporțional cu puterea instalată la consumatorii din această categorie.

Dacă parametrii $\bar{a}_{kt}$, α_k și ω_{0k} sînt determinați experimental din înregistrări efectuate pe o selecție de consumatori tipici, este posibilă generalizarea rezultatelor obținute pentru un consumator complex oarecare de structură cunoscută.

Funcția de autocorelație a unui consumator complex, va fi

$$\mu_s(\tau) = \sum_k \frac{S_k}{S_k'} \mu_{sk}'(\tau),$$

unde

S_k — este puterea instalată la consumatorii de categoria k, în consumatorul complex. S_k' și $\mu_{sk}'(\tau)$ sînt puterea instalată și funcția de autocorelație pentru consumatorii de categoria k studiați experimental.

2. CALCULUL FUNCȚIEI DE AUTOCORELAȚIE A MĂRIMII DE IEȘIRE A UNUI SISTEM LINIAR

Pentru a putea utiliza relația dată pentru funcția de autocorelație a sarcinii perturbatoare, la studii concrete de reglajul frecvenței și puterii de schimb, este necesar în prealabil să se precizeze modul în care se poate deduce funcția de autocorelație a mărimii de ieșire a unui sistem liniar în cazul în care mărimea de intrare este o funcție statistică staționară, cu funcția de autocorelație egală cu o sumă de termeni cvasiperiodici.

În general, pentru deducerea funcției de autocorelație a mărimii de ieșire, din funcția de autocorelație a mărimii de intrare, se dau în literatura de specialitate cîteva scheme analogice [6], [7]. În cazul că funcția de autocorelație a mărimii de intrare poate fi aproximată printr-o expresie analitică de forma (1), se poate folosi însă o schemă analogică mai simplă, pe baza considerentelor ce urmează. Funcția statistică reală a mărimii de intrare, poate fi înlocuită printr-o funcție statistică echivalentă, avînd aceeași funcție de autocorelație.

Fiecare din termenii relației (1) este statistic independent, deci fiecare va putea fi echivalat separat, însumîndu-se apoi rezultatele obținute. Funcția statistică echivalentă a termenului k, se obține dacă se consideră o succesiune de funcții armonice amortizate necorelate între ele

$$x_{ek} = \sum \pm a_k e^{-\alpha_k (t-t_i)} \cos [\omega_k (t - t_{ik}) - \varphi_k]. \tag{2}$$

Funcția de autocorelație a funcției statistice x_{ek} este

$$\mu_{xek}(\tau) = \tag{3}$$

$$= \lim_{T \to \infty} \left\{ n\, T\, a_k^2 \frac{1}{T} \int e^{-\alpha_k t} \cos [\omega_k t - \varphi_k] e^{-\alpha_k (t+\tau)} \cos [\omega_k (t + \right.$$

$$\left. + \tau) - \varphi_k] \, dt \right\} = \frac{n a_k}{4} \left(\frac{1}{\alpha_k} + \frac{1}{\sqrt{\alpha_k^2 + \omega_k^2}} \right) e^{-\alpha_k \tau} \cos \omega_k \tau.$$

Amplitudinea a_k se determină din condiția de echivalență

$$\mu_{xek}(\tau) = A_k e^{-\alpha_k \tau} \cos \omega_k \tau. \tag{4}$$

Cu ajutorul acestei funcții statistice echivalente se obține în cazul general funcția de autocorelație a mărimii de ieșire (frecvența sistemului, puterea de schimb etc.), folosind schema de calcul analogic din figura 1.

În această schemă:

G — este un generator ce produce impulsuri la intervale neregulate cu o frecvență medie n;

F — un filtru, avînd funcția pondere

$$f(t) = e^{-\alpha_k t} \cos (\omega_k t - \varphi_k);$$

S — schema bloc a sistemului, corespunzătoare sarcinii perturbatoare, ca mărime de intrare și mărimii de ieșire căutate;

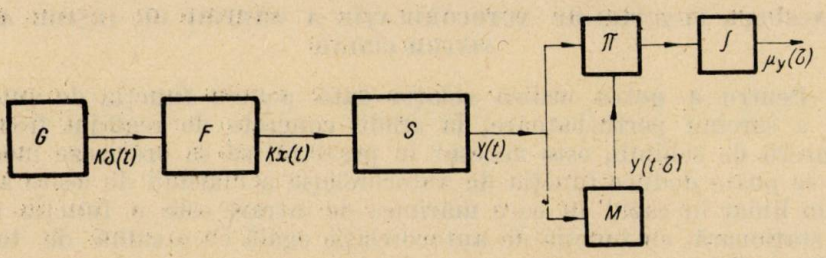


Fig. 1. — Schema de calcul analogic al funcției de autocorelație a mărimii de ieșire.

M — un element de întîrziere cu intervalul τ;

Π — elementul care efectuează produsul;

$\int$ — integrator.

În cazul particular al unui sistem liniar, se poate renunța la generatorul de impulsuri și efectua calculul pentru un singur impuls, înmulțind apoi cu n.

Dacă funcția de transfer a sistemului este simplă (sau poate fi aproximată printr-o expresie simplă), calculul poate fi efectuat analitic.

Astfel, folosind transformata dublă Laplace, rezultă pentru o funcție de autocorelație

$$\mu_x(\tau) = \sum a_k e^{-z_k \tau}, \tag{5}$$

unde

$$z_k = -\alpha_k + j\omega_k$$

și

$$\tau = |t_2 - t_1|,$$

imaginea

$$\tilde{\tilde{\mu}}_x(p_1, p_2) = \sum \frac{a_k}{p_1 + p_2}\left(\frac{1}{p_1 - z_k} + \frac{1}{p_2 - z_k}\right). \tag{6}$$

Dacă funcția de autocorelație a mărimii de intrare a unui sistem liniar cu funcția de transfer $F(p)$, are expresia (5), imaginea funcției de autocorelație a mărimii de ieșire y este

$$\tilde{\tilde{\mu}}_y(p_1 p_2) = F(p_1)F(p_2) \sum \frac{a_k}{p_1 + p_2}\left(\frac{1}{p_1 - z_k} + \frac{1}{p_2 - z_k}\right). \tag{7}$$

Funcția de autocorelație a mărimii de ieșire va fi

$$\mu_y(\tau) = \sum_k a_k F(z_k) F(-z_k) e^{z_k \tau} + \sum_k \sum_j f_j \frac{2 z_k a_k}{\nu_j^2 - z_k^2} F(-\nu_j) e^{\nu_j \tau}, \tag{8}$$

unde $\mathcal{R}e \sum f_j e^{\nu_j t}$ este originalul funcției de transfer $F(p)$.

În cazul unei funcții de autocorelație a mărimii de intrare de forma

$$\mu_{x_r}(\tau) = \sum_k a_k e^{-\alpha_k \tau} \cos \omega_k = \mathcal{R}e \sum_k a_k e^{z_k \tau},$$

funcția de autocorelație a mărimii de ieșire, rezultă

$$\mu_{y_r}(\tau) = \mathcal{R}e\, \mu_y(\tau), \tag{9}$$

unde $\mu_y(\tau)$ este dat de relația (8).

3. DETERMINAREA INDIRECTĂ A CARACTERISTICILOR PERTURBAȚIEI

Pentru verificarea expresiei deduse teoretic pentru fluctuațiile sarcinii și pentru determinarea valorilor parametrilor caracteristici, se poate recurge la determinarea indirectă a caracteristicilor perturbației.

Este posibilă determinarea aproximativă a caracteristicilor perturbației ce acționează într-un sistem electroenergetic, pornind de la variațiile de frecvență observate în exploatare. În acest scop, funcția de

autocorelație a frecvenței determinată experimental, a fost aproximată prin suma

$$\mu_v(\tau) = \sum V_i \, e^{-\alpha_i \tau} \cos \omega_i \tau. \tag{10}$$

Funcția de transfer a sistemului a fost aproximată prin expresia simplificată

$$F(p) = K \frac{p + c}{(p + a)^2 + b^2}. \tag{11}$$

Folosind inversul acestei funcții de transfer, relația (9) poate fi folosită pentru a deduce funcția de autocorelație $\mu_s(\tau)$ a sarcinii perturbatoare rezultante dintr-un sistem, din funcția de autocorelație a frecvenței

$$\mu_v(\tau)$$

$$\mu_s(\tau) = \mathcal{R}e \left\{ \sum_i V_i \left[\frac{1}{F(z_i) F(-z_i)} e^{z_i \tau} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{z_i}{c^2 - z_i^2} \frac{[(a-c)^2 + b^2][(a+c)^2 + b^2]}{cK} e^{-c\tau} \right] \right\}. \tag{12}$$

Examinarea relației de mai sus arată că pentru componentele funcției de autocorelație a frecvenței cu $|z_i|$ foarte mare sau $z_i \approx -c$ chiar dacă au o amplitudine neglijabilă, rezultă totuși valori finite ale amplitudinii componentelor funcției de autocorelație a sarcinii perturbatoare; pentru aceste componente se poate evalua cel mult o limită superioară, cunoscînd precizia de determinare a funcției de autocorelație a frecvenței și admițînd $|z_i| \neq \infty$.

Astfel încît se poate scrie

$$\mu_s(\tau) \approx \sum_i \frac{V_i}{|F(j\omega_i)|^2} e^{-\alpha_i \tau} \cos \omega_i \tau + \sum_j X_j \, e^{-\alpha_j \tau} \cos \omega_j \tau, \tag{13}$$

unde al doilea termen reprezintă componente cu amplitudini nedeterminate X_j, care se amortizează rapid sau de frecvențe mari și care nu pot fi observate în funcția de autocorelație a frecvenței. Ordinul de mărime al constantelor de timp al acestor componente rezultă din inegalitatea

$$|z_j| >> \left\{ \begin{matrix} c \\ |a + jb|. \end{matrix} \right.$$

Valorile obținute pentru sarcina rezultantă, într-o aplicație practică, sînt menționate în tabela 1, la poz. 21.

4. DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A CARACTERISTICILOR UNOR SARCINI VARIABILE

4.1. Metoda indirectă descrisă mai sus, nu permite o suficientă cunoaștere a caracteristicilor sarcinii perturbatoare, pentru următoarele motive :

— nu permite determinarea termenilor ce se amortizează rapid;
— înregistrarea fluctuațiilor frecvenței este afectată de erori mari, din cauza amplitudinilor mici ale acestor fluctuații în sisteme electroenergetice puternice; determinarea experimentală a caracteristicilor sistemului, implică de asemenea erori. Aceste două categorii de erori afectează rezultatele deduse privitor la fluctuațiile sarcinii.

Pentru a obține o imagine mai completă a caracteristicilor statistice ale sarcinilor fluctuante, s-au făcut înregistrări ale variațiilor puterii active, pe mai mulți feederi, alimentînd consumatori industriali sau consumatori complecși. Pentru a verifica dacă aceste fluctuații au un caracter staționar, s-au repetat înregistrările la intervale succesive în aceeași zi, precum și în mai multe zile succesive. Prelucrarea statistică s-a făcut asupra mărimii dedusă după eliminarea unui termen liniar din variația puterii

$$x = S - \left(\overline{S} + \frac{A}{600} t\right), \tag{14}$$

unde $\overline{S}$ este puterea medie în intervalul considerat, iar panta medie în 10 minute, A, s-a determinat din condiția ca dispersia mărimii x să fie minimă.

Funcția de autocorelație a mărimii statistice x a fost aproximată printr-o sumă de forma

$$\mu_x(\tau) = \sigma^2 \left(a_1^2 \, e^{-\frac{\tau}{T_1}} + \sum_{i=2}^{n} a_i^2 \cos \frac{2\pi}{T_i} \tau \right), \tag{15}$$

$$\sum_{i=1}^{n} a_i^2 = 1.$$

S-a ales acest mod de aproximare a funcțiilor de autocorelație empirice, deoarece cu o singură excepție (fig. 2 *d*) funcțiile de autocorelație obținute erau prea neregulate, pentru a se putea separa din ele termeni periodici amortizați (fig. 2, *a*, *b*, *c*) conform relației teoretice (1). La aceasta se adaugă faptul că pe măsură ce τ crește, precizia determinării scade.

Rezultatele obținute au fost concentrate în tabela 1, în care s-au trecut totodată;
— valoarea pantei medii, dată ca variația medie a sarcinii în 10 minute, A;
— abaterea medie pătratică $\sigma_x = \sqrt{\mu_x(0)}$,
— indicele de industrializare $m = \sigma_x^2 / \overline{S}$.

Mărimile A și σ_x au fost indicate procentual, raportate la puterea medie.

4.2. *Discuția rezultatelor experimentale*

Din datele obținute rezultă următoarele concluzii:

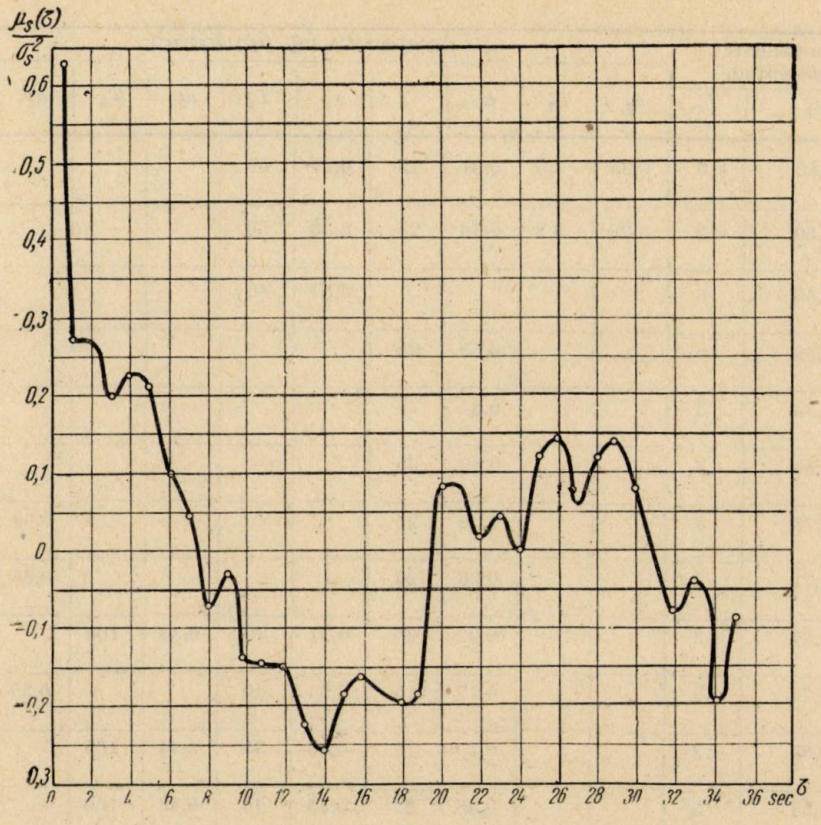
a) Pentru dispersia mărimii x și pentru componentele funcției de autocorelație a acestei mărimi, se obțin date concordante din înre-

Tabela

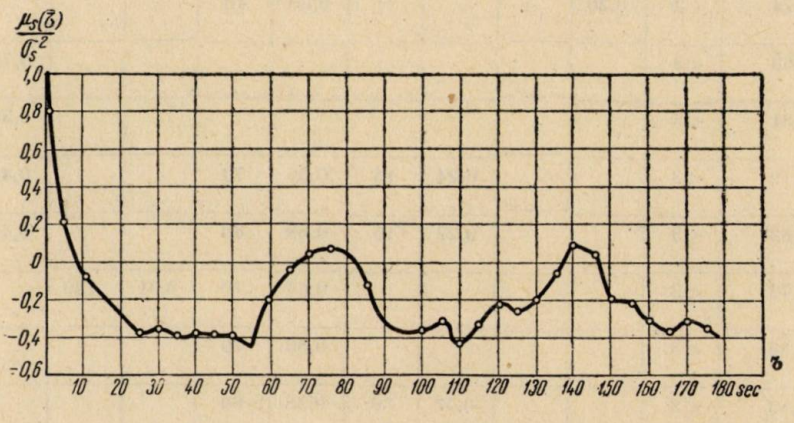
Nr. crt.	Tipul consumatorului	Data şi ora	Mod de înregistrare	Durata de înregistrare s	A %	$\frac{\sigma}{\overline{P}}$ %	m kW
1	Întreprindere metalurgică (inclusiv cuptoare electrice)	25.7 12 h.7′	Wattmetru înregistrator	620	15,8	3,08	5
2		26.7 12 h.6′	—„—	640	7,0	3,27	4,47
3	Laminor	24.7 12 h.5′	—„—	360	2,59	14,00	38,5
4		25.7 12 h.55′	—„—	480	15,00	13,65	35,8
5		26.7 12 h.5′	—„—	480	3,83	15,30	47,50
6		26.7 12 h.55′	—„—	345	2,95	16,80	60,50
7	Întreprindere electrotehnică	31.7 11 h.35′	—„—	450	1,34	2,16	0,642
8		31.7 20 h.0′	—„ —	368	4,44	2,12	0,541
9	Transport comunal	16.4 11 h.30′	—„—	480	4,15	17,20	54
10		16.4 15 h.35′	—„—	480	21,50	13,00	34
11		19.4 15 h.44′	—„—	470	11,20	11,40	26
12		20.4 15.h.35′	—„—	480	8,50	11,90	28
13		16.4 12.h 00′	Oscilograf	125		12,70	
14	Mică industrie şi consum casnic	12.4 19 h.45′	Wattmetru înregistrator	1 060	0,43	3,10	2,6
15		13.4 19 h.10′	Wattmetru înregistrator	450	10,70	2,96	2,31
16	Mică industrie şi consum casnic	31.7 11 h.35′	—„—	274	2,93	1,70	0,52
17		1.8 10 h 15′	—„—	505	3,32	2,23	0,90
18	Consumator complex (staţie electrică urbană)	13.4 19 h.10′	—„—	232	0,55	2,35	10
19		13.4 19 h.40′	—„—	480	3,74	2,23	9
20		16.4 19.h.45′	Oscilograf	118		1,89	3
21	Sarcina rezultantă în sistemul naţional		Indirect			0,22	2,18

1

Componente exponențiale		COMPONENTE PERIODICE									
a_1	T_1 s	a_2	T_2 s	a_3	T_3 s	a_4	T_4 s	a_5	T_5 s	a_6	T_6 s
0,83	<2	0,35	3,5	0,31	18	0,27	60				
0,80	<2	0,29	3,2	0,46	25	0,33	60				
0,65	6					0,67	40				
0,89	6			0,53	25						
0,54	3			0,84	25						
0,55	3			0,82	25						
0,73	3			0,30	25					0,69	300
0,71	3			0,28	20					0,65	200
0,87	<3			0,22	20	0,31	70	0,34	160		
0,74	<3			0,17	15	0,34	40			0,39	360
0,85	<3			0,19	15	0,48	35	0,44	135		
0,84	3			0,28	25	0,45	70	0,42	160		
0,74	2	0,20	3			0,60	40				
0,68	<3									0,76	400
0,81	<3									0,58	350
0,72	<3			0,24	15	0,30	70			0,46	300
0,82	<3			0,22	15	0,39	80			0,45	400
0,72	<3					0,66	70	0,31	120		
0,86	<3					0,53	70				
0,83	<3			0,43	30	0,38	>60				
0,26	4					0,77	70				

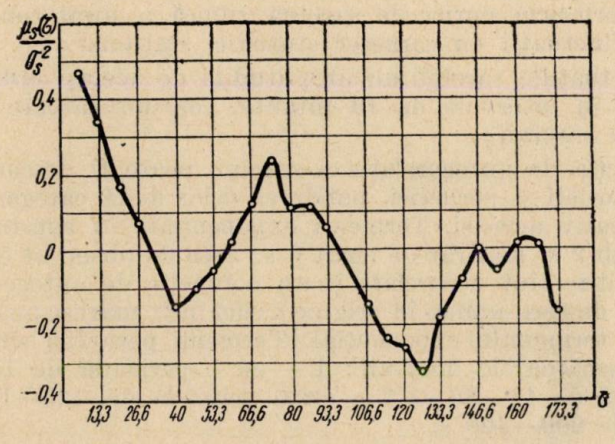


a

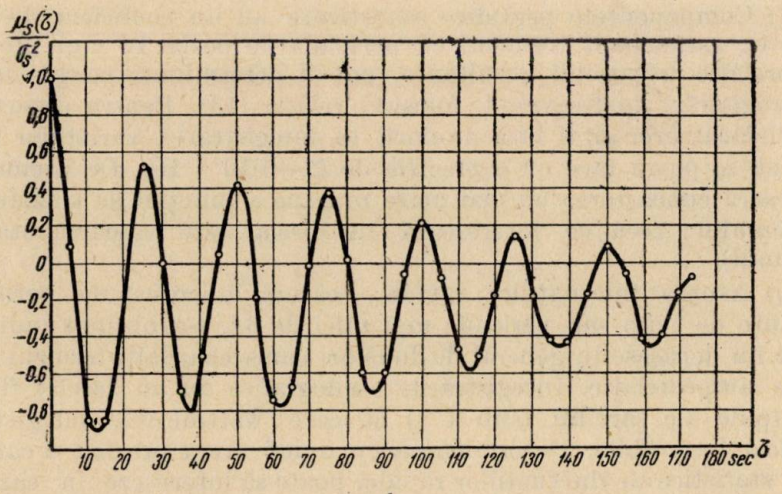


b

Fig. 2. *a* şi *b* — Funcţii de autocorelaţie a puterii unor consumatori complecşi. *a* — mică industrie şi consumatori casnici; *b* — staţie electrică urbană.



c



d

Fig. 2. *c* şi *d* — Funcţii de autocorelaţie a puterii unor consumatori complecşi *c* — întreprindere metalurgică, inclusiv cuptoare electrice ; *d* — laminor.

gistrări efectuate pe același feeder, la intervale succesive sau în zile diferite la aceeași oră;

b) Panta medie A, diferă mult de la o înregistrare la altă înregistrare efectuată pe același feeder;

c) Rezultă astfel că variațiile lente ale puterii consumate, a căror succesiune formează curba de sarcină zilnică a unui consumator, sînt însoțite de fluctuații cu caracter statistic, staționar;

d) Fluctuațiile sarcinii au amplitudini de același ordin de mărime cu variațiile în intervale de 10 minute, corespunzătoare pantei medii de variație a sarcinii;

e) Funcția de autocorelație a sarcinii poate fi descompusă în termeni exponențiali și periodici, ponderea celor două categorii de termeni este aproximativ aceeași. Termenii exponențiali au constante de timp, în general sub 2 s, mai rar de circa 6 s. Este de observat că majoritatea erorilor de citire sînt necorelate și au o funcție de autocorelație cu valoare diferită de zero numai în origine astfel încît măresc aparent valoarea în origine a termenului exponențial. Termenii periodici sînt grupați în general în următoarele domenii: 1 — cu o perioadă de 15—25 s; 2 — cu o perioadă de 40—80 s; 3 — cu o perioadă de 120—160 s; 4 — cu o perioadă de 200—400 s.

Prezența cuptoarelor electrice face să apară de asemenea și o componentă periodică cu perioada de circa 3 s.

f) Componentele periodice amortizate au un coeficient de amortizare mic, astfel încît termenii cu perioada de peste 10 s ai funcției de autocorelație a sarcinii rezultante, pot fi determinați pe cale indirectă din înregistrări de frecvență, folosind relația (13). Pentru determinarea lor satisfăcătoare, ar fi însă de dorit ca înregistrarea variațiilor de frecvență să se poată face cu o precizie de $(2-5)10^{-3}$ Hz. De asemenea, ar fi necesară cunoașterea cu mai mare precizie a funcției de transfer medii a sistemului; ceea ce interesează în special este valoarea staționară (statismul).

g) Asupra fluctuațiilor rapide — cărora le corespund termeni cu constante de timp sau perioade mai mici de 3 s, s-a obținut indicația că aceștia nu depășesc în general de două ori suma celorlalți termeni ai funcției de autocorelație. Înregistrările oscilografice nu au decelat fluctuații mai rapide ale sarcinii (sub 1 s) la care wattmetrele înregistratoare să fi fost insensibile. Determinarea cu o mai mare precizie a caracteristicilor statistice ale fluctuațiilor rapide, poate să intereseze în cazul unei linii de interconexiune care funcționează în apropiere de limita capacității de transport.

În asemenea cazuri, este utilă determinarea funcțiilor de autocorelație ale puterii cerute de mari consumatori cu variații rapide ale sarcinii, cum sînt: întreprinderile cu cuptoare electrice și transporturile. Sinteza datelor obținute în studiul unei selecții de consumatori de acest fel, poate fi făcută pe baza relației teoretice (1).

5. APLICAȚII

5.1. *Predeterminarea fluctuațiilor puterii de schimb.* Dacă se cunosc funcțiile de transfer a două sisteme ce se vor interconecta, se pot predetermina fluctuațiile puterii de schimb ce vor apare în urma interconexiunii. În absența reglajului automat al puterii de schimb și în ipoteza că în ambele sisteme, perturbațiile sînt funcții statistice staționare, de ordinul doi, și fluctuațiile puterii de schimb vor varia tot după o funcție statistică staționară de ordinul doi; funcția de autocorelație a acestora rezultă ca original al expresiilor operaționale

$$\widetilde{\widetilde{\mu}}_{P_s P_s}(p_1 p_2) = \frac{\widetilde{F}_1^2}{\widetilde{F}_\Sigma^2}\,\widetilde{\widetilde{\mu}}_{P_1 P_1} + \frac{\widetilde{F}_2^2}{\widetilde{F}_\Sigma^2}\,\widetilde{\widetilde{\mu}}_{P_2 P_2} \quad \text{(a)} \tag{16}$$

$$\widetilde{\widetilde{\mu}}_{P_s P_s}(p_1\ p_2) = \frac{1}{\widetilde{F}_\Sigma^2}\,(\widetilde{\widetilde{\mu}}_{v_1 v_1} + \widetilde{\widetilde{\mu}}_{v_2 v_2}). \quad \text{(b)}$$

S-a notat $\widetilde{\widetilde{\mu}}_{P_1 P_1}$ ($\widetilde{\widetilde{\mu}}_{P_2 P_2}$) transformata dublă Laplace a funcției de autocorelație a perturbației rezultante din sistemul 1 (respectiv 2); $\widetilde{\widetilde{\mu}}_{v_1 v_1}$ ($\widetilde{\widetilde{\mu}}_{v_2 v_2}$) transformata dublă Laplace a funcției de autocorelație a frecvenței sistemului 1 (respectiv 2) la funcționare izolată

$$\widetilde{F}^2 = F\ (p_1)\ F(p_2),$$

$$\widetilde{F}_\Sigma = F_1(p) + F_2(p).$$

Se observă că pentru regimul staționar expresiile deduse mai sus se reduc la expresiile cunoscute în literatură [11].

Dacă la funcționarea interconectată intervine un reglaj secundar al frecvenței și puterii de schimb, se schimbă funcția de transfer a sistemului și apare o a doua mărime de intrare, puterea de schimb P_s; ecuația caracteristică devine

$$\widetilde{v}_i(p) = \Phi_i(p)\,\widetilde{P}_i(p) + \Phi_{is}(p)\,\widetilde{P}_s(p), \tag{17}$$

$$i = 1,\ 2.$$

Imaginea funcției de autocorelație a fluctuațiilor puterii de schimb, rezultă

$$\widetilde{\widetilde{\mu}}_{P_s P_s} = \frac{1}{\Phi_\Sigma^2}\,(\widetilde{\Phi}_1^2\,\widetilde{\widetilde{\mu}}_{P_1 P_1} + \widetilde{\Phi}_2^2\,\widetilde{\widetilde{\mu}}_{P_2 P_2}), \tag{18}$$

iar dacă se cunosc fluctuațiile frecvențelor înainte de interconectare și de introducerea reglajului secundar

$$\widetilde{\widetilde{\mu}}_{P_s P_s} = \frac{1}{\widetilde{\Phi}_\Sigma^2}\left[\frac{\widetilde{\Phi}_1^2}{\widetilde{F}_1^2}\,\widetilde{\widetilde{\mu}}_{v_1 v_1} + \frac{\widetilde{\Phi}_2^2}{\widetilde{F}_2^2}\,\widetilde{\widetilde{\mu}}_{v_2 v_2}\right], \tag{19}$$

$$\text{cu } \widetilde{\Phi}_\Sigma = \widetilde{\Phi}_1 + \widetilde{\Phi}_2 + \widetilde{\Phi}_{1s} + \widetilde{\Phi}_{2s}.$$

Pentru determinarea funcțiilor de autocorelație ale puterii de schimb, din imaginile calculate cu una din expresiile (16) — (19) se poate folosi una din metodele prezentate în paragraful 2. În cazul utilizării relațiilor (17) sau (19) se vor întîmpina însă aceleași dificultăți ca și la determinarea indirectă a sarcinii perturbatoare rezultante (vezi paragraful 3). Relațiile (17) și (19) pot fi folosite de aceea numai pentru termenii cu variație relativ lentă, evaluarea termenilor cu variații rapide, putînd fi făcută numai pe baza evaluării componentelor corespunzătoare în sarcinile perturbatoare rezultante și a aplicării relațiilor (16) sau (18).

5.2. *Determinarea experimentală a caracteristicilor dinamice ale unui sistem electroenergetic.* Fluctuațiile sarcinii unui mare consumator de energie electrică, pot fi folosite pentru determinarea caracteristicilor dinamice ale sistemului electroenergetic, folosind metode statistice. Pentru a compara această metodă cu alte metode folosite în același scop, este util să amintim diferitele căi de determinare a caracteristicilor dinamice ale unui sistem.

a) Într-un nod al sistemului se provoacă o variație bruscă a sarcinii active și se determină astfel răspunsul tranzitoriu al sistemului.

Avantajele acestei metode sînt următoarele :

— variația sarcinii poate fi aleasă suficient de mare, pentru ca variațiile frecvenței să poată fi măsurate cu o precizie satisfăcătoare;

— volumul rezultatelor experimentale este redus, iar prelucrarea acestora nu prezintă dificultăți.

Dezavantajele metodei sînt :

— variația bruscă a sarcinii poate să conducă la perturbarea regimului de exploatare al sistemului, sau să fie greu realizabilă;

— caracteristicile determinate în condițiile unor variații mari ale parametrilor de regim, ar putea să nu fie extrapolabile în domeniul variațiilor mai reduse, specifice problemelor de reglaj;

— variațiile statistice ale consumației din sistem, suprapunîndu-se peste variația dirijată, pot conduce la erori în determinarea răspunsului tranzitoriu. Efectul probabil al acestor erori, poate fi evaluat, dacă se cunosc caracteristicile perturbației; efectul lor poate fi redus, dacă se fac mai multe determinări și apoi se determină un răspuns mediu, folosind criteriul erorii medii pătratice minime.

— parametrii caracteristicilor sistemului nu au în general o valoare unică bine determinată; efectuarea unui număr mai mare de încercări și determinarea valorii medii și a dispersiei, pentru fiecare parametru are de aceea avantajul unei informații mai complete, decît se poate obține dintr-o încercare unică.

b) Cu ajutorul uneia din centralele sistemului, prevăzută cu un regulator special, se produc variații armonice, de diferite frecvențe, ale puterii injectate în sistem. Făcînd apoi analiza spectrală a variațiilor frecvenței sistemului, se determină amplitudinea componentei avînd aceeași frecvență cu perturbația armonică și se construiește caracteristica de frecvență a sistemului.

Această metodă elimină dezavantajele enumerate pentru metoda deconectărilor, însă reglajul armonic al puterii injectate este greu de realizat.

c) Se variază în limite destul de largi cu diferite viteze și amplitudini, puterea injectată în sistem de una din centrale și se înregistrează simultan variația puterii injectate și a frecvenței. Între funcțiile de autocorelație a variației puterii injectate și funcția de corelație mixtă dintre această putere variabilă și frecvență, există relația

$$\widetilde{\mu}_{Pv}(p) = \widetilde{F}(p)\,\widetilde{\mu}_{PP}(p). \tag{20}$$

Rezolvarea ecuației integrale, permite determinarea parametrilor sistemului.

Deși practic mai ușor de realizat decît cele precedente, metoda propusă mai sus, prezintă totuși dezavantajul de a necesita perturbarea regimului normal de exploatare al sistemului.

d) În regim normal de exploatare a unui sistem electroenergetic, se poate aplica o metodă asemănătoare cu cea precedentă, dacă în sistem există un mare consumator cu variații mari de încărcare astfel încît componenta variației puterii cerute, datorită acestor variații de încărcare, să depășească considerabil variația de putere datorită variației frecvenței și tensiunii sistemului de alimentare. Dacă se înregistrează variațiile puterii active cerute de acest mare consumator, simultan cu variațiile frecvenței în sistem, determinarea parametrilor căutați se face în același fel ca și în metoda precedentă. Avantajul metodei constă în faptul că nu necesită modificări artificiale ale regimului sistemului energetic.

În sistemele energetice puternice, ea prezintă însă dezavantajul că pentru a putea sesiza componentele variației frecvenței corelată cu un singur mare consumator, sînt necesare înregistrări de o mare precizie ale variației frecvenței.

Compararea valorilor absolute ale dispersiilor fluctuațiilor puterii unor mari consumatori ($\sigma \leqslant 0{,}4$ MW) și a dispersiilor sarcinii rezultante determinate indirect ($\sigma \approx 2 \div 5$MW), arată că pentru a se putea aplica în sistemul R.P.R. metoda statistică de determinare a caracteristicilor sistemului fără perturbarea regimului de exploatare este necesară mărirea preciziei aparatului de înregistrare a abaterilor frecvenței de circa 5 ori față de valoarea indicată pentru determinarea indirectă a caracteristicilor sarcinii rezultante (vezi paragraful 4.2), în ipoteza că se folosesc drept sarcini perturbatoare, tocmai cele analizate. Efectuarea măsurătorilor la un mare laminor sau la cuptoare metalurgice de mare putere, poate însă permite efectuarea determinărilor și cu aceeași aparatură ca și pentru determinarea sarcinii perturbatoare rezultante; acest lucru este cu atît mai mult valabil, în cazul variației intenționate a puterii injectate în sistem.

e) Dacă două sisteme interconectate conțin un consumator ale cărui variații de putere să poată fi considerate independente de regimul sistemului, se pot determina caracteristici relative ale celor două sisteme,

dacă se înregistrează simultan perturbațiile datorite acestui consumator și fluctuațiile puterii de schimb. Relația folosită este

$$\widetilde{\mu}_{P_1 P_s}(p) = \frac{\widetilde{F}_2(p)}{\widetilde{F}_1(p) + \widetilde{F}_2(p)} \widetilde{\mu}_{P_1 P_1}(p), \tag{21}$$

unde P_1 este perturbația în sistemul 1 iar P_s este fluctuația puterii de schimb.

Avantajul metodei față de cea precedentă constă în faptul că nu necesită înregistrări de frecvență de mare precizie.

Dacă pentru rezolvarea ecuațiilor integrale ce apar la folosirea metodelor statistice, se folosește o metodă de transformare, în ecuații algebrice [8], sau o metodă de iterație [9], [10] și se utilizează criteriul minimalizării erorii medii pătratice, se obține totodată cea mai bună aproximație liniară cu parametrii constanți, valabilă în domeniul regimurilor normale de exploatare — a ecuației caracteristice reale neliniare cu parametrii variabili ai sistemului.

6. CONCLUZII

Expresia generală dedusă pentru funcția de autocorelație a sarcinii rezultante, este

$$\mu_x(\tau) = \sigma_x^2 \sum a_i^2 e^{-\alpha_i \tau} \cos \frac{2\pi}{T_i} \tau.$$

Astfel, funcția de autocorelație conține pe lîngă termenii aperiodici ($T_i = \infty$) determinați teoretic pe un model de tip Poisson [1], [2] și termeni periodici ($\alpha_i = 0$) sau cvasiperiodici determinați teoretic pe un model studiat într-o lucrare anterioară [5].

Încercări experimentale au confirmat prezența unor termeni periodici sau cvasiperiodici în funcțiile de autocorelație ale unor sarcini parțiale. Relațiile date în lucrare permit deducerea dispersiei frecvenței și puterii de schimb a sistemelor electroenergetice interconectate, ținînd seama de fenomenele dinamice. Dificultatea principală în aplicarea relațiilor stabilite o constituie faptul că variațiile sarcinilor perturbatoare rezultante, nu pot fi măsurate direct. Studii teoretice și experimentale efectuate, arată că această dificultate poate fi ocolită, în ceea ce privește termenii cu variație lentă, prin determinări indirecte și prin extrapolarea unor rezultate experimentale parțiale în cazul termenilor cu variație rapidă.

Fluctuațiile în regim normal ale sarcinilor pot fi folosite pentru determinarea caracteristicilor dinamice ale sistemului energetic. Dacă precizia măsurării frecvențelor nu permite aplicarea acestei metode, este posibilă provocarea unor fluctuații ale puterii injectate în sistem, în care caz relațiile matematice aplicate sînt aceleași.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES FLUCTUATIONS DE LA CHARGE ET SES APPLICATIONS AU CALCUL DES FLUCTUATIONS DE LA PUISSANCE D'ÉCHANGE ET À LA DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES CARACTÉRISTIQUES DYNAMIQUES D'UN SYSTÈME ÉLECTRO-ÉNERGÉTIQUE

RÉSUMÉ

L'expression théorique de la fonction d'autocorrélation de la charge, déduite dans une étude précédente :

$$\mu_x(\tau) = \sigma_x^2 \sum a_i^2 \, e^{-\alpha_i \tau} \cos \frac{2\pi}{T_i} \tau$$

a éte vérifiée expérimentalement par des essais faits sur quelques consommateurs complexes.

L'auteur propose une méthode de calcul analogique et fournit des relations permettant de déterminer la fonction d'autocorrélation de la grandeur de sortie, d'un système linéaire, dans le cas d'une grandeur d'entrée statistique dont la fonction d'autocorrélation est quasi-périodique. Les variations de la charge résultante, dans un système énergétique, ne pouvant être mesurées directement, il faudra faire appel à une méthode indirecte : les termes à variations relativement lentes pourront être déduits de la fonction d'autocorrélation de la fréquence — en utilisant la fonction de transfert inverse du système — ,et les termes à variations très rapides rien que par l'extrapolation des résultats expérimentaux obtenus pour quelques consommateurs représentatifs.

L'auteur indique les relations permettant de calculer la fonction d'autocorrélation des fluctuations de la puissance d'échange et analyse, par comparaison avec d'autres méthodes, une méthode d'étude expérimentale des caractéristiques dynamiques du système, à l'aide des fluctuations de la charge de certains consommateurs.

BIBLIOGRAFIE

1. G. LEHMANN, *Calcul du spectre des fluctuations du courant absorbé par un réseau de distribution électrique.* Bul. SFE, 7, **III**, *34*, oct., 593—596 (1953).
2. R. FORTET, *Spectre des fluctuations du courant absorbé par un réseau de distribution électrique.* Bul. SFE, 7, **IV**, *47*, 712—717 (1954).
3. M. MESAROVIC, I. OBRADOVIC, D. KALIC, S. SPIRIDONOVIC, *Measurement of the transfer functions in the electric power systems, using spontaneous power variations.* Power Apparatus and Systems, *46*, febr. (1960).
4. I. PREMINGER, *Recherche de la tenue moyenne de la fréquence dans les réseaux électriques à l'aide des fonctions d'autocorrélation et de densité spectrale.* CIGRÉ, Rap. *310* (1960).
5. E. ARIE, *Studiul pe modele probabilistice al fluctuațiilor sarcinilor în sisteme electroenergetice.* St. cerc. energ., **XII**, *3*, (1962).

6. Х. Ланинг, Р. Баттин, *Случайные процессы в задачах автоматического управления*. И.И.Л. Москва 1958.
7. А. В. Солодов, *Статистическое исследование нестационарных процессов в линейных системах с применением инверсных моделирующих устройств*. Авт. и телемех., **XIX** (1958).
8. T. P. Goodman, *Determination of the Characteristics of Multi-Input and Nonlinear Systems, from Normal Operation Research*. Trans. ASME, **79**, *3*, 567 (1967).
9. И. П. Леонов, Л. Н. Липатов, *Применения статистических методов для определения характеристик объектов*. Авт. и телемех., **XX**, 1959.
10. L. Uzun, D. Nestorescu, *Metode statistice de determinare pe cale experimentală a caracteristicilor dinamice de frecvență*. Automatica şi electronica, **5**, *6*, 259—266 (1961).

STUDIUL OPTIMIZĂRII REGLAJULUI AUTOMAT AL FRECVENȚEI ȘI PUTERILOR ÎN SISTEMELE ENERGETICE CU AJUTORUL UNUI CALCULATOR ANALOGIC

DE

F. MANEA, S. IONESCU și P. NICOLAE

621.311.1.072.618

Interconexiunea marilor sisteme energetice prin linii electrice cu capacitate de transport relativ redusă impune introducerea controlului automat al puterilor schimbate între sisteme și totodată reglajul automat al frecvenței.

Problema reglajului frecvenței și puterii electrice în sistemele electroenergetice deși se încadrează în problema generală a reglajului automat, prin specificul său a format obiectul unor preocupări aparte. Deși în ultimii zece ani s-au aplicat diverse sisteme de reglaj, soluții ale problemei formează încă obiectul unor articole recente din revistele tehnico-științifice de specialitate [1]—[4].

Importanța mare și complexitatea problemei necesită mijloace de studiu moderne ca folosirea mașinilor electronice de calcul. Pentru studiul regimurilor tranzitorii de reglaj al frecvenței și puterii în vederea determinării soluțiilor optime, calculatoarele de tip analogic constituie un mijloc eficace datorită posibilității pe care ne-o oferă de a urmări rapid desfășurarea soluției în timp prin înregistrare grafică. Variantele optime pot fi astfel ușor selecționate.

În prezenta lucrare s-au analizat regimurile tranzitorii de reglaj pentru cazul tip a două sisteme energetice interconectate. Fiecare sistem energetic a fost considerat ca un sistem echivalent, alcătuit din două grupuri sincrone — dintre care unul prevăzut numai cu reglaj primar,

iar celălalt cu reglaj primar, secundar şi terţiar — şi un consumator local cu caracteristică liniară de frecvenţă-putere.

S-a urmărit influenţa diverşilor termeni (proporţional, integral şi diferenţial) ai ordinului de reglaj primar, secundar şi terţiar, asupra regimurilor tranzitorii ale frecvenţei, puterii de schimb şi repartiţiei puterilor între grupurile generatoare. Perturbaţia considerată a fost treapta de putere ce poate să apară în oricare din cele două sisteme energetice.

S-a căutat să se evidenţieze unele mărimi care menţin invariant aspectul curbelor de regim tranzitoriu spre a se putea obţine concluzii utile referitoare la repartiţia puterilor între grupurile generatoare în condiţii optime. Caracteristicile economice de creşteri relative, funcţii ale puterilor centralelor echivalente au fost considerate liniarizate. Drept criteriu de optimizare s-a ales aspectul cît mai puţin oscilant al curbelor de putere şi frecvenţă, iar pentru compararea obiectivă valoarea integralei în timp a modulului abaterii de frecvenţă.

Pentru unul din cazurile studiate cu ajutorul maşinii analogice, s-au analizat şi caracteristicile logaritmice amplitudine-frecvenţă şi fază-frecvenţă în vederea aprecierii cu ajutorul metodelor practice de calcul a performanţelor sistemului. S-a folosit procedeul bazat pe metode statistice pentru determinarea ecartului tip, drept criteriu de optimizare.

IPOTEZE, ECUAŢII, NOTAŢII

Cu ajutorul calculatorului analogic liniar MECAN-1 s-au studiat procesele tranzitorii descrise de ecuaţiile diferenţiale liniarizate corespunzătoare cazului a două sisteme energetice interconectate printr-o linie electrică. Fiecare sistem energetic a fost considerat ca alcătuit din două centrale echivalente, una prevăzută numai cu un regulator de viteză de tip proporţional şi diferenţial (*P. D.*), iar cealaltă pe lîngă regulator primar — de tip proporţional, diferenţial şi integral (*P. I. D.*)—regulator secundar (*P.I.D.*) Ulterior s-a considerat şi cazul cel mai general cînd ar exista şi un reglaj terţiar.

Ipotezele simplificatoare adoptate au fost următoarele :

1. Frecvenţa sistemelor energetice ω este unică. Deoarece procesul tranzitoriu de reglaj al frecvenţei are durata de ordinul zecilor de secunde, oscilaţiile de sincronizare dintre maşinile generatoare cu perioada de ordinul fracţiunilor de secundă nu au o influenţă esenţială putîndu-se neglija [3], [4].

2. Parametrii caracteristici, exprimaţi în valori relative (raportaţi la valorile nominale), sînt identici pentru toate maşinile sistemului. În realitate parametrii caracteristici pot să difere într-o oarecare măsură influenţa diferenţelor nefiind însă esenţială pentru scopul urmărit.

3. S-au neglijat jocurile, insensibilităţile şi neliniaritatea sistemelor de reglaj. Insensibilitatea regulatoarelor primare este în mod uzual de ordinul sutimilor de Hz [1] încît influenţa sa nu este importantă pentru procese tranzitorii la care abaterea de frecvenţă este de ordinul zecimilor de Hz.

4. Caracteristica statică frecvență-putere a consumatorilor este liniară. Pentru caracteristica dinamică frecvența-putere s-a admis că diferența față de cea statică provine numai din cuplurile de inerție ale mașinilor rotative.

Ecuațiile operaționale și notațiile adoptate la studiul reglajului au fost următoarele :

Ecuația puterii unui grup generator prevăzut cu regulator primar de viteză :

$$(T_1 p + 1) P_1 + K_1 \left(1 + m_1 p + \frac{n_1}{p}\right) \omega + l_1 = 0.$$

Abaterea de putere P_1 s-a exprimat în unități relative considerînd puterea nominală a grupului drept unitate. Constanta de timp T_1 a regulatorului de viteză a fost aleasă la valoarea $T_1 = 5s$. Coeficientul de amplificare proporțională K_1 (inversul statismului) a fost considerat $10 \div 20$. Dozajul accelerometric m_1 a fost variat între $0 \div 2$ s. Dozajul integral n_1 a fost variat între $0 \div 1$ s^{-1}.

Ordinul de reglaj secundar l_1 satisface ecuația regulatorului secundar de frecvență

$$T_{11} p l_1 - P_1 - \left(\frac{\alpha_1}{p} + \beta_1 + p\,\gamma_1\right) \omega - \left(\frac{\alpha_1'}{p} + \beta_1' + p\,\gamma_1'\right) \frac{P_s}{\lambda_A\, \pi_A} = 0.$$

Constanta de timp T_{11} a fost schimbată de la $5 \div 50$ s. De asemenea, coeficienții corespunzători tipului de reglaj-integral (α_1, α_1') proporțional (β_1, β_1') accelerometric (γ_1, γ_1') precum și energia reglantă secundară λ_A au fost modificați în vederea obținerii unor valori optime. Conform ecuației anterioare, s-a considerat cazul în care ordinul de reglaj secundar aservește puterea electrică a grupului echivalent. Coeficientul π_A se datorește faptului că raportarea puterii de schimb dintre sisteme P_s, s-a făcut la întreaga putere nominală a sistemelor P_n, iar în ecuație trebuia scrisă valoarea relativă a puterii de schimb raportată la puterea nominală a sistemului respectiv P_{nA}

$$\frac{P_s}{\pi_A} = \frac{P_s}{P_{nA}} \cdot P_n.$$

Ecuații asemănătoare se scriu și pentru celelalte grupuri echivalente.

Exprimarea în unități relative prin raportarea puterilor fiecărui grup la cele nominale respective este avantajoasă și pentru programarea mașinii analogice. Pe lîngă faptul că diversele constante apar în ecuații ca mărimi specifice ale fiecărui grup, programarea optimă este ușurată, scările în unități relative fiind unice pentru o aceeași mărime. Totodată în acest caz se poate observa ușor comparativ, din curbele înregistrate, efortul fiecărei mașini la realizarea ordinului de reglaj.

Ecuația mișcării rotoarelor mașinilor electrice rotative din sistemul energetic unic, este următoarea :

$$(Mp + D)\omega = \pi_1 P_1 + \pi_2 P_2 + \pi_3 P_3 + \pi_4 P_4 - (\Delta_A + \Delta_B).$$

Momentul de inerție M al sistemului unic este alcătuit din suma momentelor de inerție al mașinilor rotative

$$M = \sum_i M_i \pi_i .$$

Coeficientul global D de autoreglaj al sarcinii include și efectul grupurilor generatoare ce funcționează la sarcina limită (cînd regulatorul nu acționează).

Ecuația puterii de schimb dedusă din aceea a echilibrului de putere s-a exprimat în forma următoare:

$$-P_s + \frac{D_B - D_A}{2}\omega + \frac{M_B - M_A}{2}p\omega + \frac{\pi_1 P_1 + \pi_2 P_2 - \pi_3 P_3 - \pi_4 P_4}{2} = \frac{\Delta_A - \Delta_B}{2}$$

$$-P_s + \frac{D_3\pi_3 + D_4\pi_4 - D_1\pi_1 - D_2\pi_2}{2}\omega + \frac{M_3\pi_3 + M_4\pi_4 - M_1\pi_1 - M_2\pi_2}{2}p\omega +$$

$$+ \frac{\pi_1 P_1 + \pi_2 P_2 - \pi_3 P_3 - \pi_4 P_4}{2} = \frac{\Delta_A - \Delta_B}{2} .$$

Schema tipică a sistemelor energetice considerate este cea din figura 1.

Cele două sisteme energetice A și B au grupuri sincrone totalizînd o putere nominală $P_{nA} = 1\,000$ MW respectiv $P_{nB} = 4\,000$ MW. Fiecare sistem energetic posedă grupuri prevăzute numai cu un reglaj primar $P_{n2} = 750$ MW, $P_{n4} = 3\,000$ MW și grupuri cu reglaj primar, secundar și terțiar $P_{n1} = 250$ MW respectiv $P_{n3} = 1\,000$ MW.

Momentele de inerție ale grupurilor rotative au valorile timpilor de lansare $M_A = 12$ s, $M_B = 16$ s. Constantele de timp ale regulatoarelor

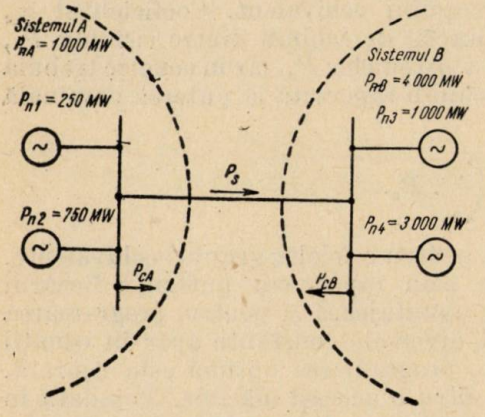


Fig. 1. — Schema sistemelor energetice

$P_n = P_{nA} + P_{nB} = 5\,000$ MW,

$\pi_1 = \frac{P_{n1}}{P_n} = 0{,}05$; $\pi_2 = \frac{P_{n2}}{P_n} = 0{,}15$; $\pi_3 = \frac{P_{n3}}{P_n} = 0{,}2$; $\pi_4 = \frac{P_{n4}}{P_n} = 0{,}6$; $\pi_A = \frac{P_{nA}}{P_n} = 0{,}2$; $\pi_B = \frac{\pi_{nB}}{P_n} = 0{,}8$.

primare au valorile $T_1 = T_3 = 5$s, $T_2 = T_4 = 8$s. Factorii de amplificare frecvență-putere au fost considerați la valorile $K_1 = K_3 = 20$ $K_2 = K_4 = 10$. Coeficienții autoreglajelor sarcinii au fost evaluați $D_A = D_B = 1$.

Schema structurală bloc a sistemului de ecuații corespunzătoare cazului tipic analizat este cea din figura 2.

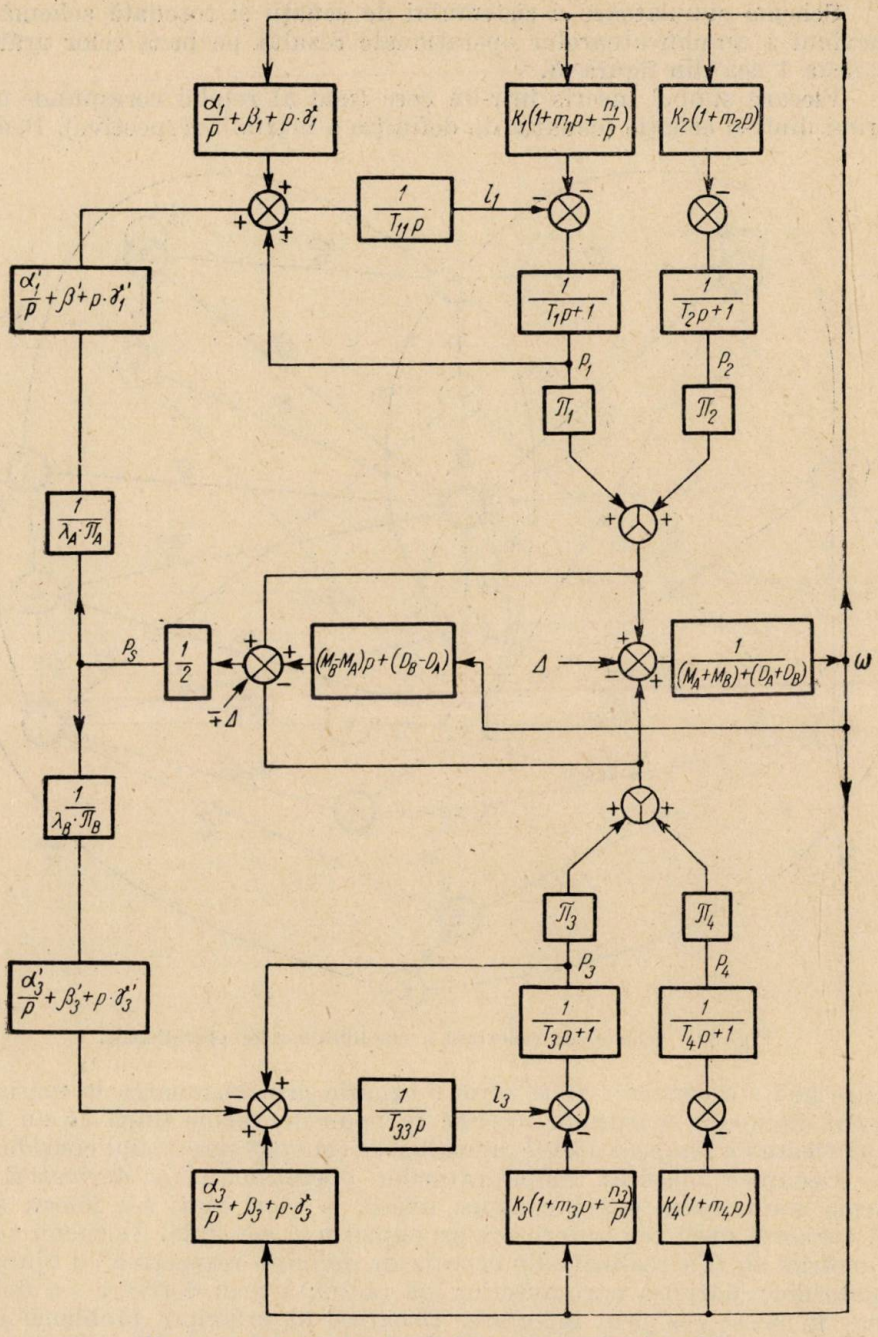


Fig. 2. — Schema structurală bloc a sistemului de reglaj.

Schema simulatoare a sistemului de ecuaţii şi totodată schemă de conexiuni a amplificatoarelor operaţionale rezultă pe baza celor arătate în anexa 1 cea din figura 3.

Fiecare simbol înscris într-un cerc (nod al reţelei corespunde unei mărimi dintr-o ecuaţie (ecuaţia de definiţie a mărimii respective). Pentru

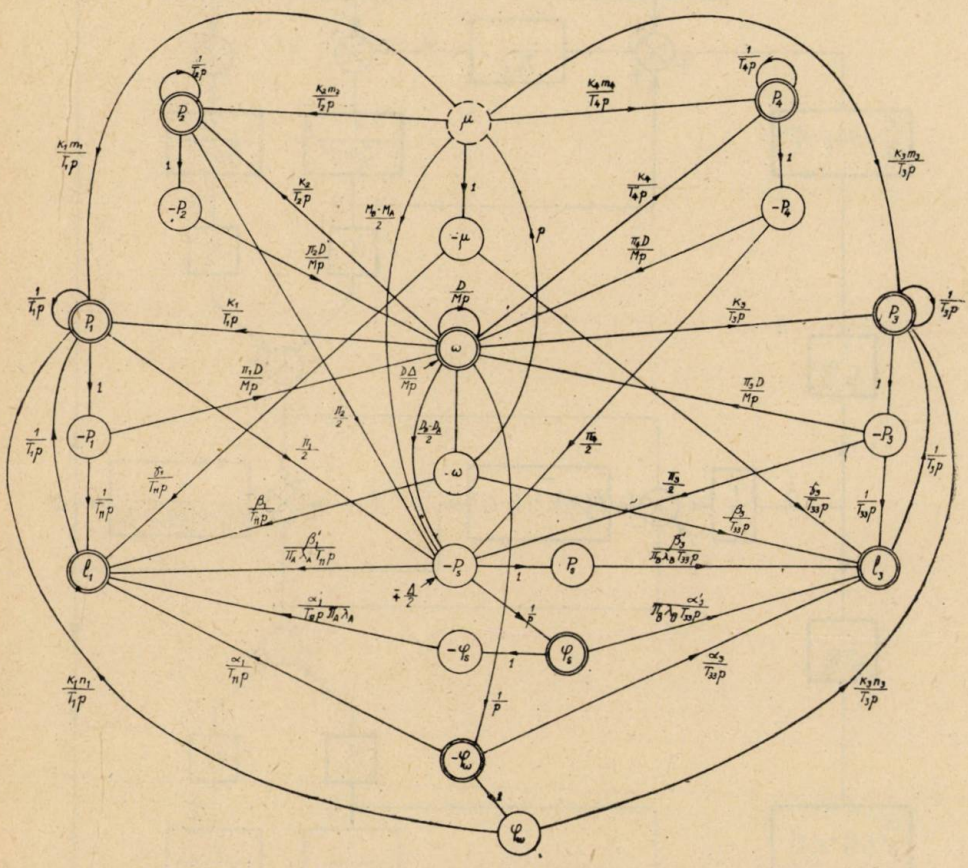


Fig. 3. — Schema de conexiuni a amplificatoarelor operaţionale.

fiecare nod s-a convenit să se scrie o ecuaţie prin însumarea la mărimea înscrisă în nod a mărimilor înscrise în nodurile vecine după ce au fost multiplicate cu „impedanţele" ramurilor ce converg spre nodul considerat.

Deoarece folosirea amplificatorilor operaţionali ca derivatori în schema simulatoare poate conduce uneori la erori mari s-a folosit şi o altă variantă decît cea anterioară principial mai generală. Termenii accelerometrici au fost realizaţi din ecuaţia de definiţie respectivă cu ajutorul sumatorilor. Mărimea care anterior era obţinută prin derivare s-a determinat în acest caz prin integrare. Deoarece în principiu problema este simplă, nu se vor reda detalii asupra modului particular de soluţionare.

CRITERII DE OPTIMIZARE A REGLAJULUI AUTOMAT

Folosirea calculatoarelor analogice în studiul performanțelor unui sistem de reglaj automat, este evident mai fructuoasă decît folosirea metodelor de calcul analitic. Posibilitățile de a analiza fiind mai mari se poate schimba însăși obiectivul esențial al studiului. Astfel, problema stabilității sistemului de reglaj, a performanțelor aproximative cedează locul problemei optimizării reglajului. Avînd desfășurarea în timp a întregului proces se pot ușor selecționa variantele optime, se pot remarca influențele sensibile ale schimbării diverșilor parametri.

În prezenta lucrare s-a adoptat drept criteriu obiectiv de optimizare integrala minimă a modulului abaterii de frecvență la o perturbație treaptă de putere. Fără observarea procesului tranzitoriu acest criteriu ar fi uneori incomplet. De aceea, s-a observat și aspectul curbelor de regim tranzitoriu căutîndu-se să se realizeze procese în care abaterea maximă să fie cît mai mică, regimul de variație a puterilor să fie cît mai puțin oscilant iar durata fenomenului tranzitoriu să fie cît mai mică.

Problema perturbației tip adoptate (treaptă, armonică, aleatorie) este discutabilă. Pentru reglajul frecvenței și puterilor s-a încercat să se adopte drept criteriu ecartul tip de frecvență și putere admițînd unele legi de variație simplă pentru densitatea spectrală (transformata Fourier a funcției de autocorelație) a curbei consumației ca funcție de timp [5]. Această metodă se bazează pe ipotezele că la schimbarea sarcinii variațiile bruște nu sînt importante iar funcția perturbatoare staționară posedă o importantă memorie statistică. Utilitatea practică a metodelor statistice pentru reglajul frecvenței și puterilor a fost controversată în discuții recente [6]. În practică, criteriul erorii pătratice medii minime este insuficient [7] și greoi din punctul de vedere al calculelor analitice [7], [8]. Pentru sistemele de reglaj deja puse în funcție criteriul dispersiilor minime ar putea fi folosit la îmbunătățirea performanțelor corespunzătoare.

La proiectarea sistemelor de reglaj automat este însă uzuală examinarea vîrfului de rezonanță al funcției de transfer (amplitudine-frecvență). Criteriile practice obținute cu ajutorul caracteristicilor armonice ale funcțiilor de transfer regulate (de ordinul doi) oferă indicații orientative fără certitudinea valabilității pentru sisteme de ordin mai ridicat.

Pentru unul din cazurile studiate cu ajutorul mașinii analogice s-a folosit și metoda de calcul analitic rezultatele fiind concordante (orientativ) cu cele oferite de curbele regimului tranzitoriu (anexa 2).

Cea mai indicată perturbație ușor de realizat la studiu cu ajutorul calculatorului analogic este evident treapta de putere. De altfel perturbațiile cu caracter aleatoriu, nu trebuie să obosească sistemul de reglaj; rolul esențial al acestuia în sistemele energetice fiind de a împiedica marile fluctuații de putere pe liniile de interconexiune și de a realiza o repartiție economică a puterilor între grupuri.

Dacă turbinele ar fi supuse în mod continuu unui efort de reglaj prea exigent, pe lîngă uzură, ar părea și o scădere sensibilă a randamentului [9].

INFLUENȚA LEGILOR ȘI A PARAMETRILOR DE REGLAJ ASUPRA PROCESULUI TRANZITORIU DE REGLAJ

În cazul schemei tipice a sistemului energetic considerat, s-a analizat influența etajelor de reglaj (primar, secundar și terțiar), precum și influența termenilor (proporțional — P, integral — I și diferențial — D) ai ordinului de reglaj asupra regimurilor tranzitorii ale frecvenței, puterii de schimb și puterilor grupurilor generatoare.

Scopul studiului a fost acela de a desprinde din analiză rolul și importanța practică pe care o poate avea fiecare etaj și termen al ordinului de reglaj asupra regimului tranzitoriu, sensibilitatea regimului tranzitoriu optim la schimbări ale parametrilor și posibilitatea variației repartiției puterilor între grupuri (și a eforturilor de reglaj) încît procesul de reglaj să rămînă optim.

Ținînd seama de realitatea și importanța practică a problemei s-a acordat o atenție mai mare parametrilor regulatorului secundar. Regulatoarele primare uzuale (mecanice) oferă mici posibilități de adoptare a parametrilor, iar cele terțiare acționează lent încît regimurile tranzitorii corespunzătoare nu creează probleme.

Pentru cazul sistemului energetic care are grupuri generatoare prevăzute numai cu regulatoare primare de tip proporțional (centrale termice funcția de transfer a sistemului de reglaj automat este de gradul doi [10], [11], (sistem regulat). Prin urmare, comportarea sa în regim tranzitoriu se poate studia ușor și pe cale analitică. De aceea acest regim a fost folosit și pentru verificarea funcționării corecte a amplificatoarelor operaționale corespunzătoare.

După cum este binecunoscut, micșorarea statismului (mărirea factorului de amplificare proporțională) duce la creșterea suprareglajului și la sporirea numărului de oscilații ale procesului tranzitoriu de viteză și putere tinzînd către instabilitate oscilatorie. Regimul optim nu poate fi decît un compromis între stabilitate și precizie. Sînt consacrate valori ale statismului de ordinul $5 \div 10\,\%$.

Caracteristic pentru un întreg sistem energetic este factorul de amplificare global, $K = \sum_i K_i \pi_i$ și promptitudinea globală $\frac{1}{\tau} = \sum_i \frac{K_i \pi_i}{T_i}$. Promptitudinea influențează direct regimul tranzitoriu în momentele inițiale [4], iar factorul de amplificare regimul permanent al frecvenței precum și cota de sarcină a fiecărui grup la variații ale consumației.

Alături de parametrii de reglaj, parametrii sistemului ca timp de lansare $M = \sum_i M_i \pi_i$ și autoreglajul sarcinii D intervin în determinarea procesului.

Pentru cazul regulatoarelor primare la care intervine în plus un ordin de reglaj proporțional cu viteza de variație a frecvenței (accelerometric)

funcția de transfer are de asemenea ordinul doi și deci sistemul se poate studia comod și prin calcul analitic. Dozajul accelerometric pentru întregul sistem $m = \frac{\sum_i K_i \pi_i m_i}{\sum_i K_i \pi_i}$, are un efect favorabil de stabilizare a reglajului amortizînd puternic oscilațiile de reglaj atît pentru frecvență, cît și pentru puterea cerută grupurilor reglante [4].

Optimizarea sistemului de reglaj prin schimbarea dozajului accelerometric ar însemna realizarea unui regim încît puterea reglantă și frecvența să varieze în regim tranzitoriu aperiodic critic, eventual cu un ușor suprareglaj. Practic, un asemenea regim este dificil de realizat fiind necesar un efort prea mare din partea grupurilor reglante (viteza de variație a puterii cerute grupurilor ar fi prea mare). Regulatoarele cu dozaj accelerometric se realizează mai ales ca regulatoare electrice. Regulatoarele mecanice ale turbinelor hidraulice, cu reacție elastică au de asemenea un dozaj accelerometric care însă nu poate fi schimbat independent de alți parametri.

Introducerea unui ordin de reglaj proporțional cu integrala vitezei, ceea ce este posibil în cazul regulatoarelor electrice, permite realizarea unui reglaj astatic și totodată impunerea unei repartiții dorite (eventual economică) a sarcinilor între grupurile reglante. Dozajul termenului integral echivalent pentru întregul sistem va fi

$$n = \frac{\sum_i n_i \pi_i K_i}{\sum_i \pi_i K_i}.$$

Analizînd aspectul curbelor de regim tranzitoriu se remarcă o mică influență a dozajului termenului integral asupra deviației maxime. Aceasta se datorește faptului că termenul integral acționează cu întîrziere, treptat în timp. Valorile mari ale dozajului integral au condus la un regim tranzitoriu oscilant cu frecvență de oscilație apropiată de cea corespunzătoare reglajului proporțional fără dozaj accelerometric. Valorile mici ale dozajului integral conduc la un regim tranzitoriu lent (fig. 4).

Dozajul termenului integral poate fi schimbat de la simplu la dublu în jurul valorii optime, fără ca regimul tranzitoriu să difere esențial (fig. 5).

Se poate schimba repartiția abaterii sarcinilor între grupuri prin modificarea dozajului termenilor integrali și fără modificarea procesului tranzitoriu de reglaj al frecvenței, dacă se va păstra invariantă valoarea dozajului echivalent al întregului sistem.

Existența grupurilor cu reglaj primar *P.D.* alături de cele cu reglaj *P.I.D.* are un efect favorabil de reducere a abaterii maxime și scurtarea duratei procesului de reglaj.

S-a analizat în continuare influența asupra proceselui de reglaj a regulatorului secundar de tip *P.I.D.* Termenul proporțional al ordinului de reglaj secundar (în prezența reglajului primar de tip proporțional) micșorează într-o oarecare măsură abaterea maximă a deviației de frec-

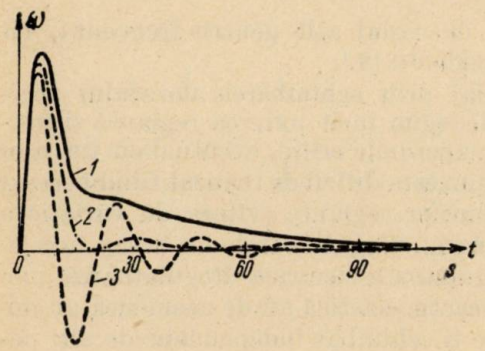


Fig. 4. — Influența dozajului integral din reglajul primar (*P.I.D*) asupra procesului tranzitoriu de frecvență

1) $n_1 = n_3 = 0{,}104\ s^{-1}$
2) $n_1 = n_3 = 0{,}216\ s^{-1}$
3) $n_1 = n_3 = 0{,}624\ s^{-1}$

$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 2$ s.

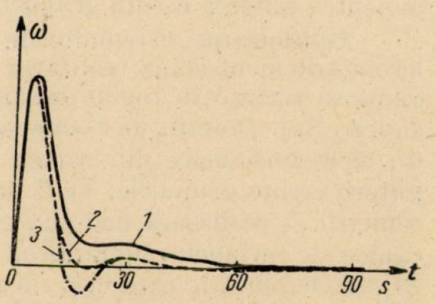


Fig. 5. — Influența schimbării termenului integral din reglajul primar în jurul valorii optime.

1) $n_1 = n_3 = 0{,}156\ s^{-1}$
2) $n_1 = n_3 = 0{,}216\ s^{-1}$ (optim)
3) $n_1 = n_3 = 0{,}312\ s^{-1}$

$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 2$ s.

vență. În cazul aservirii puterii la ordinul de reglaj secundar valoarea factorului de amplificare proporțională secundar β determină regimul permanent și deci eroarea staționară de reglaj (fig. 6).

Repartiția abaterilor de putere între grupuri este totodată determinată de valorile coeficienților β_i. O dată cu creșterea factorului β se accentuează caracterul oscilant al regimului tranzitoriu. Un efect puternic de amortizare a acestor oscilații o are dozajul accelerometric din reglajul primar.

Termenul proporțional din reglajul secundar intervine cu folos în prezența unui termen integral, contribuind la grăbirea procesului de reglaj prin efectul său stabilizator de împiedicarea oscilațiilor lente. Coeficientul β trebuie să aibă în acest caz o valoare optimă care depinde atît de constanta de timp a motorașului integrator cît și de coeficientul α al termenului integral (fig. 7).

Constanta de timp a motorașului integrator are efectul invers celui al coeficientului β.

Pentru întregul sistem energetic, constanta echivalentă $\beta = \sum_i \beta_i \pi_i$ determină contribuția termenilor proporționali la procesul de reglaj (dacă constantele de timp ale motorului integrator nu diferă mult de la un grup la altul). În cazul cînd constantele de timp sînt mult diferite, caracteristică pentru un întreg sistem energetic este promptitudinea reglajului

secundar $\frac{1}{\tau'} = \sum_i \frac{\beta_i \pi_i}{T_{ii}}$. De altfel promptitudinea este un parametru care menține aproape invariant (pentru β_i și T_{ii} variabili) aspectul curbelor de regim tranzitoriu [4].

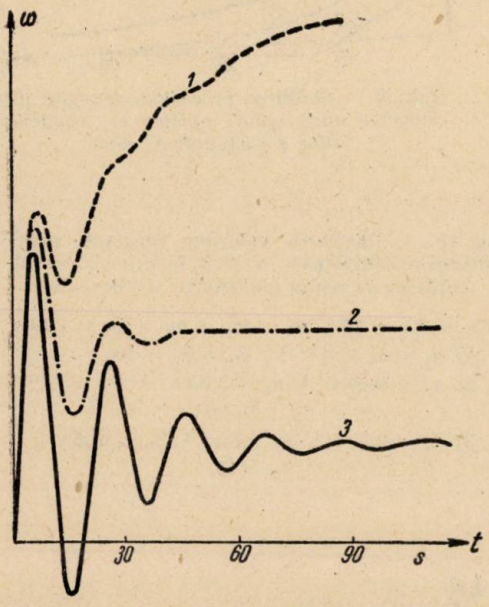


Fig. 6. — Influența factorului de amplificare proporțională β asupra regimului tranzitoriu de frecvență. În sistemul *A* izolat reglajul primar și secundar este efectuat numai de grupul 1.

$T_{11} = 10$ s; $\alpha_1 = 0$;
1) $\beta_1 = 5$; 2) $\beta_1 = 20$; 3) $\beta_1 = 50$.

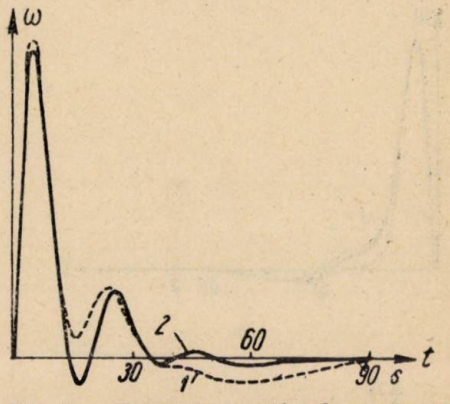


Fig. 7. — Factorul proporțional amortizează oscilațiile lente grăbind procesul de reglaj dacă nu este mult depășită valoarea optimă;

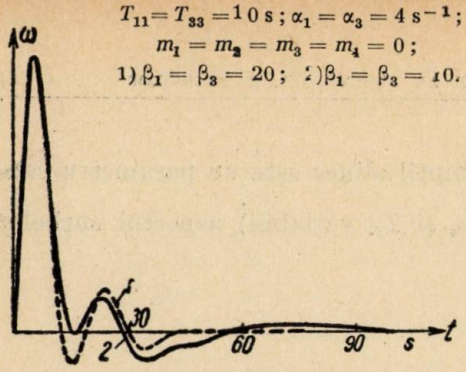
sistemul *B* izolat: $T_{33} = 20$ s; $\alpha_3 = 4$ s^{-1}; $m_3 = m_4 = 0$;
1) $\beta_3 = 20$; 2) $\beta_3 = 40$.

Se pot obține variații de la simplu la dublu ale constantei, β, respectiv ale promptitudinii în jurul valorilor optime încît regimul tranzitoriu să rămînă apropiat de cel optim (fig. 8).

Introducerea termenului integral în lanțul regulatorului secundar nu influențează practic abaterile maxime ale frecvenței și puterilor. Procesul de reglaj este însă mult grăbit dacă se aleg valori optime pentru coeficienții α_i și β_i (fig. 9).

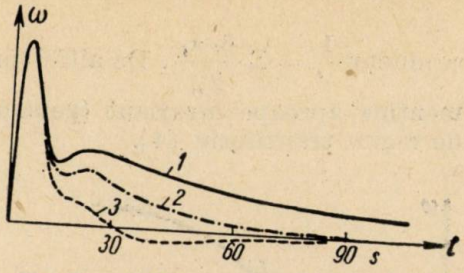
La valorile mari ale coeficienților α_i apar oscilații lente de reglaj care pot fi înlăturate în prezența termenilor proporționali (β_i).

Pentru întregul sistem energetic este caracteristică valoarea echivalentă $\alpha = \sum_i \alpha_i \pi_i$ care, dacă motoarele integratoare au aceleași constante de timp T_{ii}, mențin aspectul curbelor de regim tranzitoriu invariant pentru α_i variabili (fig. 10).



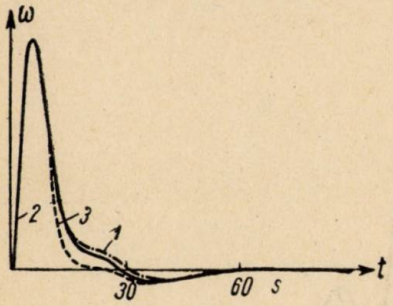
$T_{11} = T_{33} = 10$ s; $\alpha_1 = \alpha_3 = 4\ s^{-1}$;
$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 0$;
1) $\beta_1 = \beta_3 = 20$; 2) $\beta_1 = \beta_3 = 10$.

Fig. 8. — Variația de la simplu la dublu a constantei β nu influențează sensibil regimurile apropiate de cele optime. Ambele sisteme cu reglaj primar și secundar.



$m_1 = m_2 = 1{,}14$ s; $T_{11} = 10$ s; $\beta_1 = 20$;
1) $\alpha_1 = 1\ s^{-1}$; 2) $\alpha_1 = 2\ s^{-1}$; 3) $\alpha_1 = 4\ s^{-1}$.

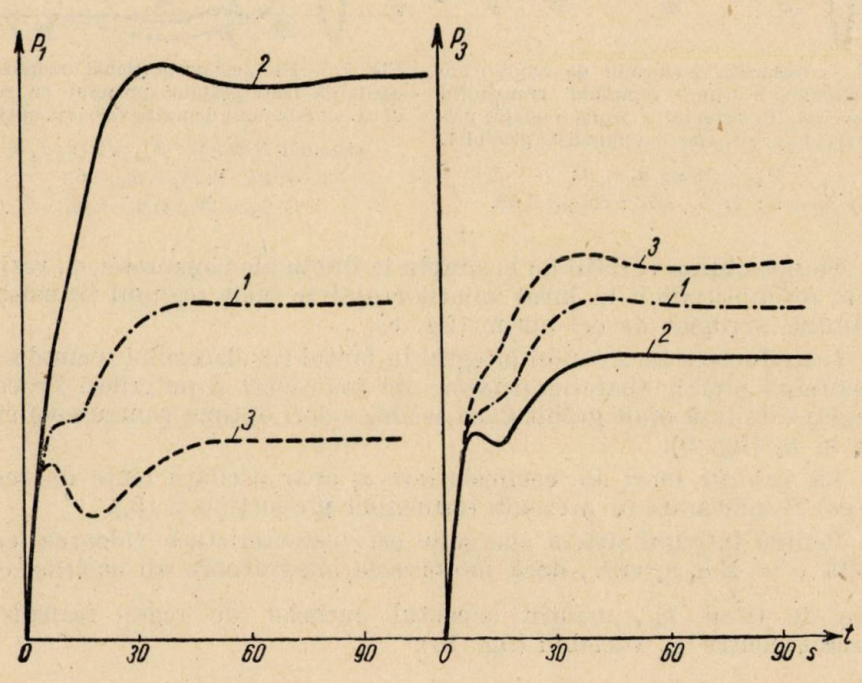
Fig. 9. — Grăbirea procesului de reglaj prin alegerea unor valori optime ale coeficienților α sistemul *A* izolat



a

Fig. 10. — Păstrarea valorilor constante pentru dozajele echivalente α și β menține aspectul curbelor de regim tranzitoriu al frecvenței

$T_{11} = T_{33} = 10$ s; $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 1{,}14$ s.
1) $\alpha_1 = \alpha_3 = 4\ s^{-1}$; $\beta_1 = \beta_3 = 20$;
2) $\alpha_1 = 6{,}66\ s^{-1}$; $\alpha_3 = 3{,}33\ s^{-1}$; $\beta_1 = 33{,}3$; $\beta_3 = 16{,}66$;
3) $\alpha_1 = 2{,}5\ s^{-1}$; $\alpha_3 = 5\ s^{-1}$; $\beta_1 = 12{,}5$; $\beta_3 = 25$.



b

Ca și în cazul altor coeficienți se poate admite o variație dublă a valorii coeficientului α în jurul celei optime încît regimul tranzitoriu să rămînă apropiat de cel optim (fig. 11).

Prin urmare, ar fi posibilă realizarea unui bun reglaj secundar cu repartiție optimă economică a puterilor între grupuri, dacă se planifică dozajul termenilor reglajului secundar de către dispecerul central.

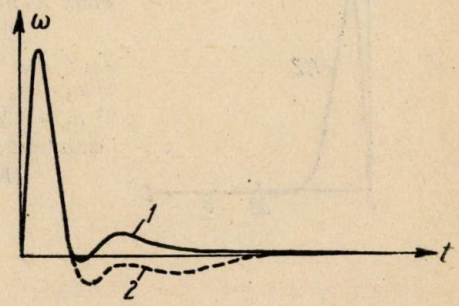


Fig. 11. — Modificarea de la simplu la dublu a coeficientului α în jurul valorii optime se poate admite. Sistemul A izolat

$T_{11} = 20$ s; $\beta_1 = 80$; $m_1 = m_2 = 1{,}14$ s.
1) $\alpha_1 = 4\ s^{-1}$; 2) $\alpha_2 = 8\ s^{-1}$.

Introducerea unui termen accelerometric în reglajul secundar are o oarecare influență asupra abaterii maxime a frecvenței și asupra procesului de reglaj. Un coeficient γ negativ oprește abaterea maximă a frecvenței și în prezența unui dozaj accelerometric primar de amortizare a oscilațiilor, sporește acțiunea termenului integral scurtînd procesul de reglaj. O valoare pozitivă a termenului accelerometric are efectul contrar. Criteriul integralei mediului abaterii de frecvență nu a evidențiat o influență importantă a termenului accelerometric. În absența unui dozaj accelerometric primar, termenul accelerometric secundar pozitiv evidențiază o influență mică de amortizarea oscilațiilor pe cînd în cazul semnului negativ o accentuare a oscilațiilor.

Analizînd interdependența dintre termenii *P.I.D.* ai reglajului primar și termenii *P.I.* ai reglajului secundar s-a remarcat, o influență asemănătoare asupra procesului tranzitoriu a termenului integral din reglajul primar (dozaj n') cu cea a termenului proporțional (coeficient β) din reglajul secundar. Schimbarea coeficientului β are o influență mai mare asupra procesului decît schimbarea valorilor dozajului n. În prezența dozajului n, coeficientul β își micșorează relativ influența asupra procesului tranzitoriu. Influența dozajului n este mai mare pentru valorile mici ale coeficientului β.

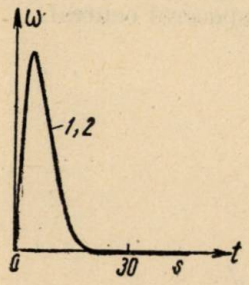
Prin urmare, un reglaj primar *P.I.D.* elimină necesitatea termenului proporțional din reglajul secundar.

Dozajul accelerometric din reglajul primar își menține consecvent influența favorabilă de amortizare a oscilațiilor rapide. Se remarcă însă o ușoară influență de accentuarea oscilațiilor lente de reglaj fiind necesară o micșorare a coeficientului α sau o mărire a lui β, în vederea realizării regimului optim.

În cazul aservirii la ordinul de reglaj a mărimii de ieșire a integratorului regulatorului secundar repartiția puterilor este determinată de

suma coeficienţilor termenilor integrali primar şi secundar $K_i\ n_i + \alpha_i$ (fig. 12).

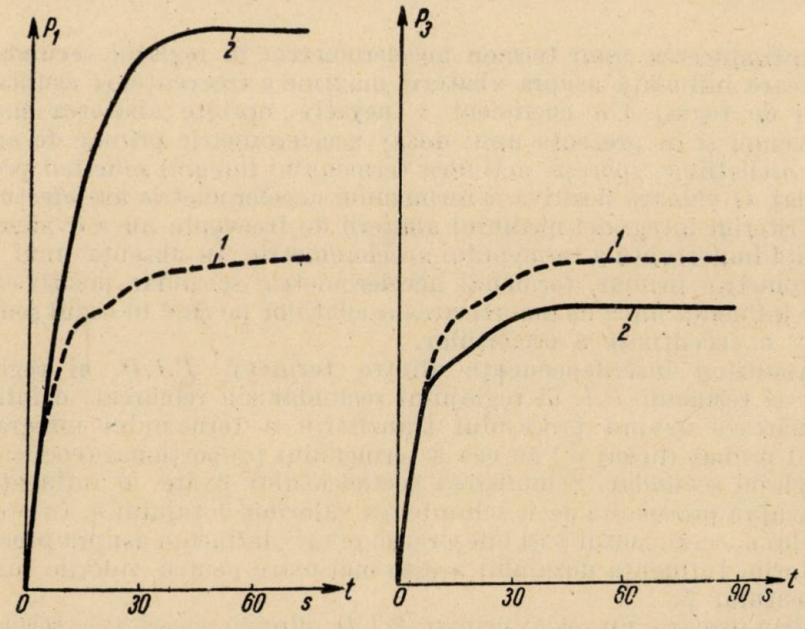
Un reglaj terţiar de tip integral, cu aservirea puterii la ordinul de reglaj poate fi folosit exclusiv pentru repartiţia economică a puterilor dacă



a

Fig. 12. — Repartiţia puterilor este determinată de suma $K_i\ n_i + \alpha_i$ în cazul aservirii la ordinul de reglaj a mărimii de ieşire a regulatorului secundar

$T_{11} = T_{33} = 10$ s; $\beta_1 = \beta_3 = 0$; $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 2$ s.
1) $n_1 = n_3 = 0{,}156\ s^{-1}$; $\alpha_1 = \alpha_3 = 2\ s^{-1}$;
2) $n_1 = 0{,}26\ s^{-1}$; $n_3 = 0{,}13\ s^{-1}$; $\alpha_1 = 3{,}33\ s^{-1}$; $\alpha_3 = 1{,}66\ s^{-1}$.
Regimurile tranzitorii de frecvenţă sînt identice deoarece
$(K_1 n_1 + \alpha_1)\ \pi_1 + (K_3 n_3 + \alpha_3)\ \pi_3 = \text{const.}$



b

acţionează lent (se alege $\frac{\alpha_i'}{T_{ii}}$ mic). În acest caz nu mai este necesar termen proporţional de stabilizare (fig. 13).

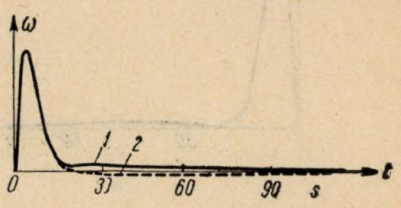
Din studiul reglajului secundar frecvenţă-putere de schimb s-au observat următoarele:

Regimul tranzitoriu de reglaj bun al frecvenței este influențat în măsură mică de cel al puterii de schimb (fig. 14).

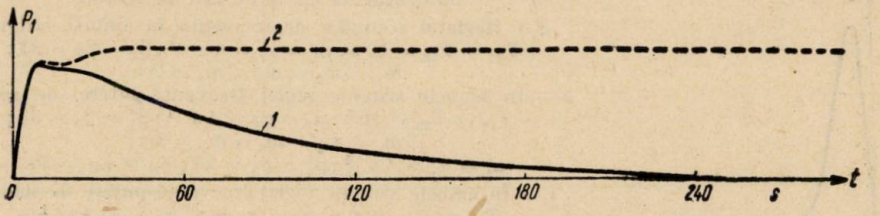
Termenii proporționali și integrali ai ordinului de reglaj al puterii de schimb au calitativ același rol ca și cei corespunzători reglajului

Fig. 13. — Reglajul terțiar de tip integral lent se poate folosi pentru repartiția puterilor

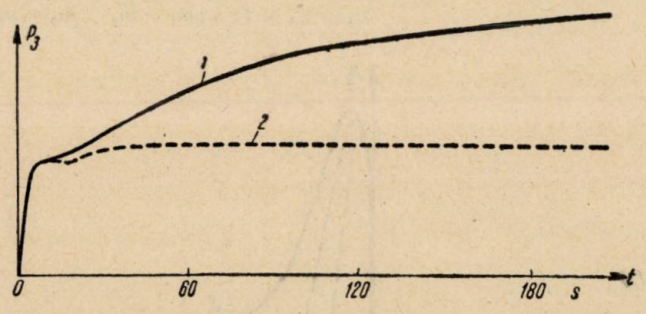
$T_{11} = T_{33} = 10$ s; $\alpha_1 = \alpha_3 = 3$ s^{-1}; $\beta_1 = \beta_3 = 33{,}33$;
$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 2$ s;
$T''_{11} = T''_{33} = 50$ s; $\beta''_1 = \beta''_3 = 0$.
1) $\alpha''_1 = 0$; $\alpha''_3 = 4$ s^{-1};
2) $\alpha''_1 = 4$ s^{-1}; $\alpha_3 = 4$ s^{-1}.



a



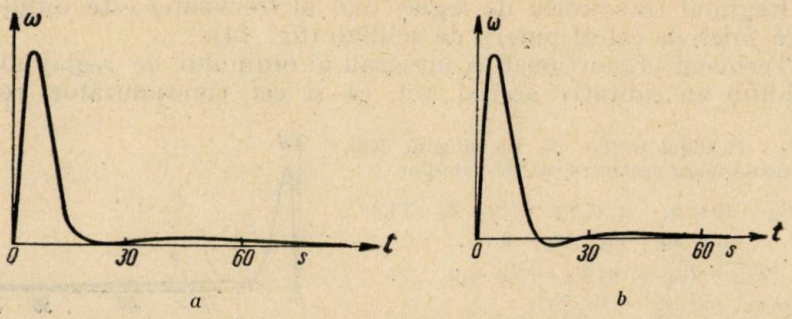
b



c

frecvenței. Termenul proporțional, caracterizat prin energie reglantă secundară λ stabilizează procesul de reglaj în cazul alegerii unei valori optime. Dacă valoarea coeficientului termenului integral de reglajul puterii de schimb α' este apropiată ca valoare de aceea a coeficientului termenului integral α de la reglajul frecvenței, valoarea optimă a coeficientului λ este apropiată de aceea a energiei reglante primare K. Dacă $\lambda < K$ apar oscilații în regimul tranzitoriu al puterilor, iar dacă $\lambda > K$ regimul devine mai lent (fig. 15).

Pentru valori mai mici ale raportului $\frac{\alpha'}{\lambda}$, caracteristic termenului integral, se obține un regim tranzitoriu al puterilor fără oscilații chiar în absența termenului proporțional.



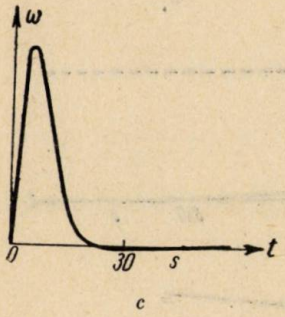


Fig. 14 *a b c.* — Regimul tranzitoriu de frecvenţă este puţin influenţat de cel al puterii de schimb.

a — Reglajul secundar de frecvenţă în ambele sisteme
$T_{11} = T_{33} = 10$ s; $\alpha_1 = \alpha_3 = 4\ s^{-1}$; $\beta_1 = \beta_3 = 33$;
$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 2$ s.

b — În ambele sisteme reglaj frecvenţă-putere de schimb
$T_{11} = T_{33} = 10$ s; $\alpha_1 = \alpha_3 = 4\ s^{-1}$; $\beta_1 = \beta_3 = 33$;
$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 2$ s;
$\alpha'_1 = \alpha'_3 = 4\ s^{-1}$; $\beta'_1 = \beta'_3 = 23$; $\lambda_A = \lambda_B = 20$.

c — În ambele sisteme reglaj frecvenţă-putere de schimb
$T_{11} = T_{33} = 10$ s; $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha'_1 = \alpha'_3 = 4\ s^{-1}$;
$\beta_1 = \beta_3 = \beta'_1 = \beta'_3 = 33$;
$\lambda_A = \lambda_B = 12{,}5$; $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 2$ s.

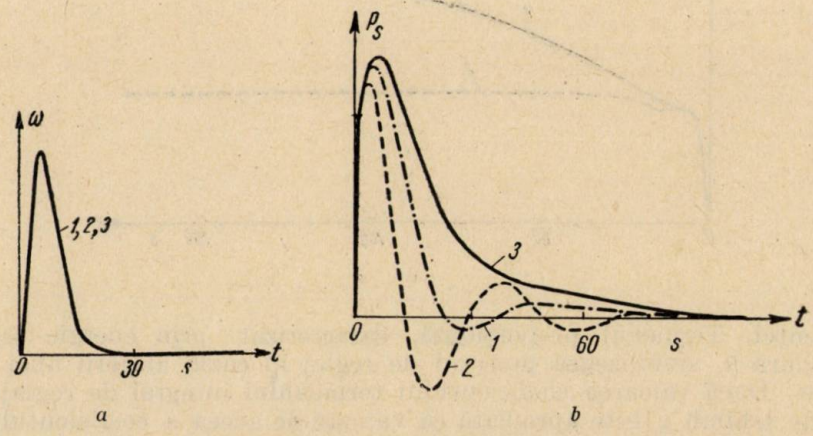


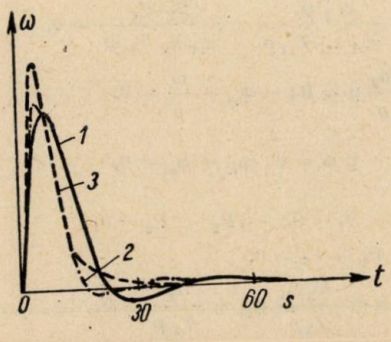
Fig. 15. — Regimuri tranzitorii de frecvenţă şi putere de schimb pentru
$\lambda = K$; $\lambda < K$; $\lambda > K$.
În ambele sisteme reglaj frecvenţă-putere de schimb
$T_{11} = T_{33} = 10$ s; $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha'_1 = \alpha'_3 = 4\ s^{-1}$; $\beta_1 = \beta_3 = \beta'_1 = \beta'_3 = 33$;

$$m_{1,2,3,4} = 2\ s\ (K_A = K_1 \frac{P_{n1}}{P_A} + K_2 \frac{P_{n2}}{P_A} = 12{,}5;$$

$$K_B = K_3 \frac{P_{n3}}{P_B} + K_4 \frac{P_{n4}}{P_B} = 12{,}5 = K_A).$$

1) $\lambda_A = \lambda_B = 12{,}5$ 2) $\lambda_A = \lambda_B = 6{,}25$ 3) $\lambda_A = \lambda_B = 25$.

Mărimea coeficientului $\frac{\alpha'}{\lambda}$ grăbește procesul tranzitoriu dar face să apară oscilații de reglaj care pot fi amortizate numai printr-o alegere corespunzătoare a coeficientului termenului proporțional.



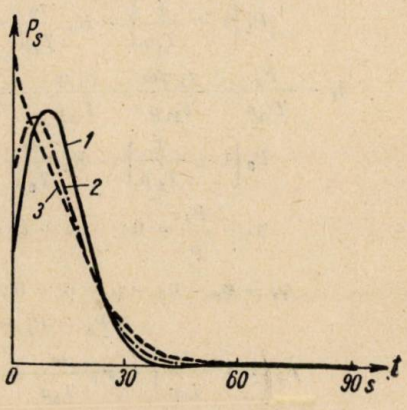


Fig. 16. — Schimbarea valorii timpului de lansare nu influențează esențial condițiile optime ale parametrilor de reglaj

$T_{11} = T_{33} = 10$ s; $\alpha_1 = \alpha_3 = 4\ s^{-1}$; $\beta_1 = \beta_3 = \beta_1' = \beta_3' = 33$; $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 2$ s; $\alpha_1' = \alpha_3' = 5{,}8$ s; $\lambda_A = \lambda_B = 13{,}7$

1. $M'' = M_B \pi_b = 12{,}8$ s; $M' = 2{,}4$ s,
2. $M'' = 25{,}6$ s; $M' = 2{,}4$ s,
3. $M'' = 6{,}3$ s; $M' = 2.4$ s.

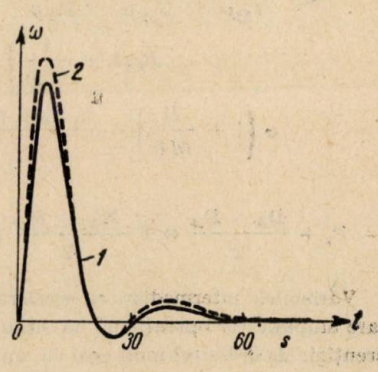


Fig. 17. — Modificarea coeficientului de autoreglaj nu are o influență importantă asupra regimului tranzitoriu optimizat. Sisteme de puteri egale cu reglaj primar *P.I.D.* de viteză.

1. $D = 1$,
2. $D = 0{,}65$.

Un parametru caracteristic al sistemului energetic este timpul de lansare (M). Schimbînd valorile acestuia în limite largi, de la jumătate la de două ori valorile nominale, s-a remarcat o oarecare influență asupra abaterilor maxime ale frecvenței, precum și o influență asupra valorilor inițiale ale șocului puterii de schimb. Aspectul global al curbelor de regim tranzitoriu (în condiții optime) nu a fost schimbat esențial, încît să apară necesară o modificare a constanțelor sistemului de reglaj (fig. 16).

De asemenea, schimbarea coeficientului de autoreglaj (de la $D = 0{,}65$ la $D = 1$) nu are o influență importantă asupra procesului tranzitoriu (fig. 17).

ANEXA I

În vederea alcătuirii schemei simulatoare care să fie totodată şi schemă de conexiuni a amplificatoarelor operaţionale [12] s-au scris ecuaţiile integrale-diferenţiale în forma următoare :

$$P_1\left(1+\frac{1}{T_1 p}\right)+K_1\frac{\omega}{T_1 p}+\frac{K_1 m_1}{T_1 p}\mu+\frac{K_1 n_1}{T_1 p}\varphi\omega+\frac{l_1}{T_1 p}=0,$$

$$l_1-\frac{P_1}{T_{11}p}-\frac{\alpha_1\varphi\omega}{T_{11}p}-\frac{\beta_1\omega}{T_{11}p}-\frac{\gamma_1\mu}{T_{11}p}-\frac{\alpha_1'\varphi_s}{\pi_A\lambda_A T_{11}p}-\frac{\beta_1'\cdot P_s}{\pi_A\lambda_A T_{11}p}=0,$$

$$P_2\left(1+\frac{1}{T_2 p}\right)+K_2\frac{\omega}{T_2 p}+\frac{K_2 m_2}{T_2 p}\mu=0\,;\;-\varphi_\omega+\frac{\omega}{p}=0,$$

$$\varphi_s-\frac{P_s}{p}=0\,;\;-\omega+\omega=0\,;\;\mu-p\,\omega=0\,;\;\varphi_\omega-\varphi_\omega=0,$$

$$\varphi_s-\varphi_s=0\,;\;-\mu+\mu=0\,;\;-P_1+P_1=0\,;\;-P_2+P_2=0,$$

$$-P_3+P_3=0\,;\;-P_4+P_4=0,$$

$$P_3\left(1+\frac{1}{T_3 p}\right)+K_3\frac{\omega}{T_3 p}+\frac{K_3 m_3}{T_3 p}\mu+\frac{K_3 n_3}{T_3 p}\varphi_\omega+\frac{l_3}{T_3 p}=0,$$

$$l_3-\frac{P_3}{T_{33}p}-\frac{\alpha_3\varphi_\omega}{T_{33}p}-\frac{\beta_3\omega}{T_{33}p}-\frac{\gamma_3\mu}{T_{33}p}+\frac{\alpha_3'\varphi_s}{\pi_B\lambda_B T_{33}p}+\frac{\beta_3' P_s}{\pi_B\lambda_B T_{33}p}=0,$$

$$P_4\left(1+\frac{1}{T_4 p}\right)+K_4\frac{\omega}{T_4 p}+\frac{K_4 m_4}{T_4 p}\mu=0,$$

$$\omega\left(1+\frac{D}{MP}\right)-\frac{\pi_1 P_1+\pi_2 P_2+\pi_3 P_3+\pi_4 P_4-\Delta_A-\Delta_B}{\frac{M}{D}p}=0,$$

$$-P_s+\frac{D_B-D_A}{2}\omega+\frac{M_B-M_A}{2}\mu+\frac{\pi_1 P_1+\pi_2 P_2-\pi_3 P_3-\pi_4 P_4}{2}-\frac{\Delta_A-\Delta_B}{2}=0.$$

Variabilele intermediare cu acceleraţia μ, unghiul φ_ω, energia φ_s s-au introdus pentru ca fiecare amplificator operaţional să simuleze regimul corespunzător unei ecuaţii integrale-diferenţiale de ordin cel mult egal cu unitatea. S-au folosit deci amplificatoare operaţionale simple : integratori, sumatori (în particular inversori) şi derivatori.

Simbolurile corespunzătoare pentru reprezentarea schemei simulatoare sînt cele din figura A_{1-1}.

ANEXA 2

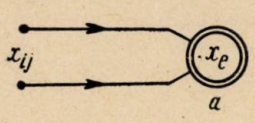
Schema structurală bloc corespunzătoare sistemului de reglaj cu două grupuri echivalente (unul cu reglaj primar şi secundar, iar celălalt cu reglaj primar) este cea din figura A_{2-1}.

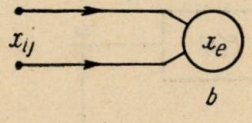
La valorile parametrilor $T_1 = 5$ s ; $T_2 = 8$ s ;

$$K_1 = 20\,;\; K_2 = 10\,;\; M = \sum_i M_i\,\pi_i = 15{,}2\text{ s}\,;\; D = 1\,;\; m_1 = m_2 = 0,$$

$$T_{11} = 10\text{ s}\,;\;\beta_1 = 20\,;\;\alpha_1 = 4\,;\;\pi_{13} = \pi_1 + \pi_3 = 0{,}25\,;\;\pi_{24} = \pi_2 + \pi_4 = 0{,}75$$

înregistrarea frecvenței cu ajutorul calculatorului analogic MECAN este dată în figura A_{2-2a}. La aceiași parametri dar cu $m_1 = m_2 = 1{,}14$ s, rezultă curba din figura A_{2-2b}.





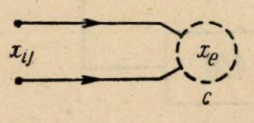


Fig. A_{1-1}. — Reprezentarea simbolică a amplificatoarelor operaționale folosite ca integrator (*a*), sumator (*b*) și derivator (*c*).

Fig. A_{2-1}. — Schema structurală bloc a sistemului de reglaj cu două grupuri echivalente.

Punînd schema structurală bloc sub forma din figura A_{2-3}, cu

$$F(p) = \frac{1}{Mp + D},$$

$$G(p) = \frac{\pi_{13}\alpha + [\pi_{13}(\beta + T_2\alpha) + \pi_{24}K_2]p + \pi_{13}\beta T_2 + T_{11}(K_1\pi_{13} + K_2\pi_{24}) + K_2\pi_{24}m_2]p^2 +}{p(1 + T_2 p)(1 + T_{11}p + T_{11}T_1p^2)}$$

$$+ \frac{T_{11}[K_1\pi_{13}(T_2 + m_1) + K_2T_{24}(T_1 + m_2)]p^3 + T_{11}[K_1\pi_{13}m_1T_2 + K_2\pi_{21}m_2T_1]p^4}{p(1 + T_2 p)(1 + T_{11}p + T_{11}T_1p^2)}.$$

s-a exprimat funcția de transfer a sistemului deschis sub forma produsului $F(p)$. $G(p)$. S-au trasat caracteristicile amplitudine-frecvență și fază-frecvență (diagramele Bode) pentru 3 valori

ale parametrului $\beta_1 = 10 ; 20 ; 40$ și $m_1 = m_2 = 0$. Rezultă o rezervă de fază cuprinsă între 20—35°.

Pentru caracteristicile care corespund la $m_1 = m_2 = 1{,}14$s ; $\beta_1 = 20$, s-a obținut o rezervă de fază de $\sim 55°$.

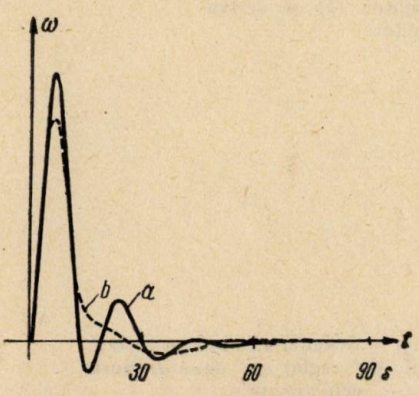


Fig. A_2-2 — Abateri tranzitorii de frecvență la perturbație treapă de putere.

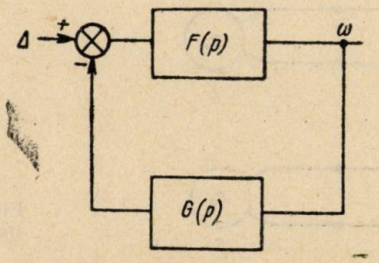


Fig. A_2-3. — Schema structurală echivalentă a sistemului de reglaj.

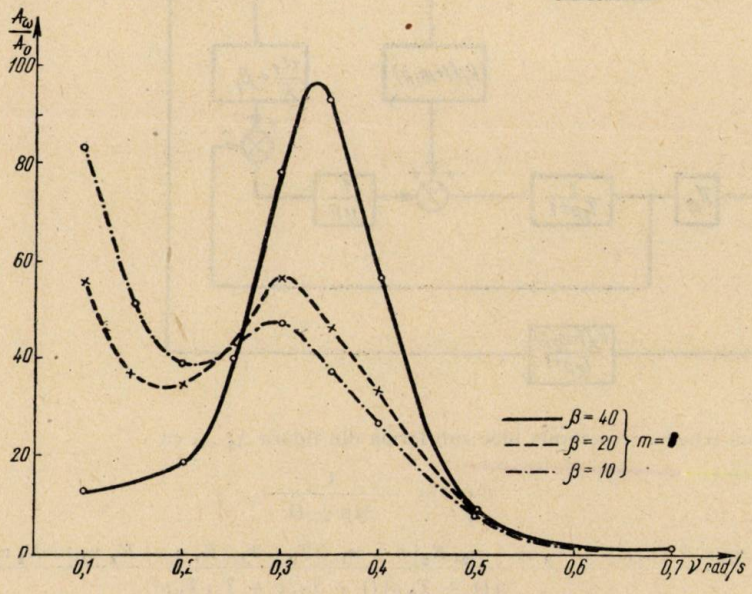


Fig. A_2-4. — Densitățile spectrale ale frecvenței.

Pentru funcția de transfer a sistemului închis $g(p) = \dfrac{F(p)}{1 + F(p).G(p)}$ s-au calculat caracteristicile amplitudine-frecvență.

Admițînd, pentru pseudo-frecvențe între $\nu_1 = 0{,}015$ Hz și $\nu_2 = 0{,}2$ Hz densitatea spectrală a variațiilor aleatorii ale mărimii perturbatoare de forma [5]

$$A_p(\nu) = \frac{A_0}{\nu^2},$$

s-au determinat densitățile spectrale ale variațiilor frecvenței $A_\omega = |g(j\nu)|^2 . A_p(\nu) = |g(j\nu)|^2 \frac{A_0}{\nu^2}$ care sînt date în figura A_{2-4}. Ecartul tip al mărimii de ieșire (frecvenței) se obține măsurînd suprafața determinată de curba densității spectrale respective.

$$\varepsilon_\omega = \int_{\nu_1}^{\nu_2} A_\omega(\nu)\, d\nu .$$

Rezultă un ecart de frecvență minim pentru $\beta_1 = 20$.

Prin urmare, în acest caz, criteriul ecartului tip nu schimbă valoarea optimă a parametrului β_1 obținută prin observarea procesului tranzitoriu la perturbație treaptă de putere.

A STUDY OF FREQUENCY AND POWER CONTROL OPTIMIZATION IN POWER SYSTEMS USING AN ANALOGIC COMPUTER

ABSTRACT

The paper studies the influence of the various terms (proportional, integral and differential) of the primary, secondary and tertiary regulating signal on the change of frequency, tie-line power and loading allocation among generator units at a step-function load disturbance.

BIBLIOGRAFIE

1. F. CAHEN, A. CHEVALIER, R. ROBERT, B. FAVEZ, J. CARPENTIER, *Les problèmes de réglage automatique de la fréquence et des échanges de puissance dans les grands réseaux.* CIGRÉ, Rap. *325* (1956).
2. L. K. KIRCHMAYER, *Differential Analyser Aids Design of Electrical Utility Automatic Dispatching System.* Trans. ALEE, Apl. — and Industry, Ian. (1959).
3. A. GRESELIN, F. SACCOMANNO, *Influence des caractéristiques des réseaux et des systèmes de réglage sur la tenue de la fréquence et des puissances d'échange.* CIGRÉ, Rap. *320* (1960).
4. F. MANEA, S. IONESCU, *Studiul unor regimuri tranzitorii de reglaj automat frecvență-putere în sistemele energetice cu ajutorul calculatorului analogic MECAN.* St. cerc. energ., **XII**-A, *4* (1962).
5. D. GADEN, *Rapport existant entre les variations de la charge consommée par la clientèle d'un réseau et les variations de fréquence qui en résultent.* BASE, *10* (1958).
6. M. LECRIQUE, T. PREMINGER, *Discuții.* CIGRÉ (1960).

7. J. GILLE, M. PELEGRIN, P. DECAULNE, *Lehrgang der Regelungstechnik.* Band. I. *Theorie der Regelungen.* VEB Verlag Technik, Berlin, 1960.

8. B. FAVEZ, *Aperçus sur une étude théorique générale du réglage de la fréquence et de la puissance d'échange des réseaux d'énergie électrique.* Bul. Technique de la Suisse Romande, *13* (1958).

9. VOLTARI, *Discuţii.* CIGRE (1960), Grup 32.

10. C. PENESCU, *Contribuţii la analiza funcţionării sistemelor de reglare automată a turaţiei agregatelor electrice generatoare care reglează frecvenţa. Probleme de automatizare.* Edit. Acad. R.P.R., 1960.

11. * * * *Analyse des différents procédés utilisés pour le réglage fréquence-puissance.* CIGRE, Rap. *328* (1960).

12. F. MANEA, S. IONESCU, M. POMÎRLEANU, *Studiul posibilităţii de reglaj rapid al unui regulator reostatic cu sectoare rostogolitoare.* St. cerc. energ., **XII**-A, *2* (1962).

INFLUENȚA VARIAȚIEI INDICILOR TEHNICO-ECONOMICI ASUPRA SOLUȚIEI OPTIME A TRANSFORMATOARELOR DE PUTERE

DE

D. CREȚU, M. BÎRGĂUANU și P. OPRIȘAN

621.314.2.011.003

1. INTRODUCERE

Concepția modernă în proiectarea transformatoarelor cere să se obțină o soluție tehnico-economică optimă care să țină seama de costul de fabricație și de cheltuielile de exploatare cum și de necesarul de fonduri e investiții suplimentare pentru acoperirea pierderilor de putere activă și reactivă ale acestora [1], [2].

Printre metodele de calcul care răspund acestui deziderat de mare circulație se bucură metoda perfectată de prof. I. Popov și recomandată în prezent fabricilor producătoare de transformatoare din țările membre CAER.

Determinarea soluției optime prin aceste metode, impune cunoașterea unor indici tehnici și economici care variază de la țară la țară funcție de dezvoltarea lor economică și pentru fiecare țară, în timp, funcție de stadiul de dezvoltare economică.

Din acest motiv, un interes deosebit prezintă modul în care depinde soluția optimă în dimensionarea transformatorului de acești indici tehnici și economici. Problema este cu deosebire importantă pentru țara noastră din următoarele motive :

— parte din acești indici tehnico-economici care se obțin pe baza unor cercetări cu caracter statistic, nu sînt în prezent suficient precizați ca valoare ;

— dezvoltarea impetuoasă a economiei noastre are drept consecință o evoluție a acestor indici;

— industria noastră produce transformatoare și pentru export; în această situație este necesar să se țină seama de influența valorii acestor indici specifici țărilor respective;

— cunoscînd influența indicilor tehnici și economici asupra soluției optime se pot face recomandări cu privire la aceia dintre ei de care trebuie ținut în primul rînd seama la calculul transformatoarelor economice și a căror determinare exactă în condițiile țării noastre și a altor țări reprezintă deosebită importanță.

Pentru studierea concretă a influenței acestor parametri asupra soluției optime, s-a ales un transformator trifazat, cu înfășurare cilindrică din aluminiu și miez din oțel silicios laminat la rece la tensiunea de 110 kV și reglaj sub sarcină. Alegerea este justificată de faptul că industria noastră electrotehnică urmează să asimileze producția unor astfel de transformatoare; pentru precizare s-a ales transformatorul de 10 MVA.

În lucrare se analizează, pentru diverse valori ale puterii de scurtcircuit, influența prețului de cost al tolei pentru circuitul magnetic, al aluminiului pentru înfășurări, al energiei electrice disipată prin pierderi în transformator, al timpului de recuperare normat, al timpului de utilizare a sarcinii maxime echivalent pierderilor nominale și a valorii inducției în coloanele circuitului magnetic, asupra soluției optime a transformatorului de parametri amintiți.

2. METODICĂ ȘI LIMITELE DE VARIAȚIE ALE INDICILOR TEHNICO-ECONOMICI ȘI INDUCȚIEI

2.1. METODICA

Metoda constă în determinarea minimului costului anual al transformatorului în care se includ: costul de fabricație raportat la termenul de recuperare, cheltuielile ce revin acoperirii pierderilor de mers în gol active și reactive la mers în sarcină.

Relațiile de calcul se găsesc dezvoltate în [1] și sînt reproduse în anexă.

2.2. LIMITE DE VARIAȚIE ALE INDICILOR TEHNICI, ECONOMICI ȘI ALE INDUCȚIEI

Pentru determinarea influenței indicilor tehnico-economici specificați în introducere, s-au stabilit limitele de variație ale acestor indici, ținînd seama: *a*) — de valorile utilizate la proiectarea transformatoarelor asemănătoare în diferite țări socialiste și de valori prezumate a fi utilizate la noi; *b*) — de necesitatea de a avea o suficientă gamă de variație a valorii lor pentru a obține o privire suficient de largă asupra contribuției lor la determinarea optimului; *c*) — de posibilitatea variației acestor valori în urma dezvoltării economiei noastre, precum și condițiile specifice țărilor în care exportăm transformatoare de putere.

În anexa 1, împreună cu relațiile de calcul se prezintă în mod sintetic limitele de variație a valorilor prezumate pentru R.P.R.

2.2.1. În lucrarea de față s-au considerat transformatoare cu înfășurări din aluminiu [3] din următoarele motive:

a) cuprul este un material deficitar atît pe piața mondială cît îndeosebi pentru țara noastră;

b) prevederile de perspectivă ale dezvoltării economiei R.P.R. indică crearea unei baze puternice a producției de aluminiu, ceea ce va constitui probabil, un argument hotărîtor pentru înlocuirea cuprului în industria electrotehnică acolo unde aceasta va fi posibil.

2.2.2. În alegerea materialului pentru circuitul magnetic, s-a avut în vedere tendința pe scară mondială de a introduce utilizarea tolei cu pierderi minime, economic justificate, care permite încărcări magnetice superioare și necesitatea introducerii tehnicii noi în industria noastră.

De aceea, s-a luat în considerare în prezentul studiu tabla silicioasă laminată la rece, care întrunește calitățile amintite.

2.2.3. Costul mediu de producție actual al energiei electrice în R.P.R. în comparație cu celelalte țări socialiste are o valoare relativ ridicată; din acest motiv limita inferioară a fost luată mai scăzută respectiv de 0,05 lei/kWh, lucru justificat deoarece se prevede o continuă scădere a acestui preț de cost, limita superioară fiind aleasă 0,30 lei/kWh.

2.2.4. Factorul ε definit prin relația (26 : anexă) depinde de:

— puterea maximă la care este utilizat transformatorul (S_m);

— durata anuală de utilizare la sarcina cu pierderi nominale de scurtcircuit (τ_m);

— durata anuală de utilizare la putere maximă, care variază funcție de tipul consumatorului între 7 500 ore pe an (pentru industria chimică) și 1 500 ore (pentru electrificări rurale) (T_m).

În medie, pentru tipul de transformator analizat și pentru condițiile din țara noastră, s-a considerat regimul corespunzător industriei constructoare de mașini pentru care $T_m = 5\,600$ ore/an și $S_m^{\wedge} = 0{,}85\, S_n$; în aceste condiții $\varepsilon = 0{,}3$. Limitele de variație au fost alese între 0,1 și 0,5, ceea ce corespunde situației actuale și de perspectivă a energeticii țării noastre.

2.2.5. Timpul de recuperare i în economia națională este normat diferit pentru fiecare ramură economică în parte; pentru industria energetică $i=10$ ani; acest indice are pentru aceeași ramură economică valori diferite în diferitele țări socialiste, iar literatura de specialitate discută mult asupra lui.

Pe măsură ce economia națională se dezvoltă, valoarea timpului de recuperare tinde să se micșoreze. Din aceste motive, limita inferioară a timpului de recuperare a investițiilor capitale a fost aleasă de 4 ani, iar limita superioară 12 ani; acest interval de variație răspunde cerințelor concrete ale energeticii noastre în continuă dezvoltare.

2.2.6. Inducția în coloana transformatorului, s-a ales pentru toate celelalte calcule la valoarea de 1,65 T, asemenea recomandărilor comisiei CAER pentru seria de transformatoare de 35 kV. Pentru a urmări influența inducției B_a asupra soluției optime a transformatorului, s-au adoptat limitele 1,525 T — 1,750 T pentru care au existat date privind puterea de magnetizare și pierderile prin histerezis și curenți turbionari. La baza

calculelor privind puterea de magnetizare P_a a miezului confecționat s-au adoptat valori ponderate între datele rezultate din măsurători pe transformatoare executate și datele din literatura privind tola de proveniență sovietică, germană și franceză.

În toate cazurile analizate s-a considerat că secțiunea jugului este de 1,1 ori mai mare decît secțiunea coloanei.

3. INFLUENȚA INDICILOR ECONOMICI ȘI A INDUCȚIEI ASUPRA GEOMETRIEI ȘI COSTULUI TRANSFORMATORULUI

Vom urmări în continuare, influența pe care indicii enunțați în introducere (costul specific al aluminiului confecționat m_{Al} [lei/kg], costul specific al fierului împachetat m_{Fe} [lei/kg], al energiei electrice m_e [lei/kWh], factorul ε, timpul de recuperare i [ani] și inducția coloană B_a) o au asupra costului anual al transformatorului K [lei/an], asupra costului minim, asupra puterii de scurtcircuit optime P_{scn} [kW] precum și asupra geometriei transformatorului, caracterizată prin dimensiunile ferestrei — lățimea F [dm], înălțimea H [dm], — diametrul cercului circumscris coloanei D [dm] și factorii de siluetă $x = \frac{H}{F}$ și $y = \frac{D}{F}$. Conform metodei adoptate tesiunea de scurtcircuit U_{sc} se păstrează constantă, la valoarea indicată de norme, fiind condiționată de funcționarea în paralel a transformatoarelor; puterea de scurtcircuit este considerată ca parametru ale cărei valori optime rezultă pentru variația fiecărui indice tehnico-economic considerat.

Costul total anual al transformatorului și geometria se studiază în funcție de fiecare indice tehnico economic și inducție în parte și anume: cînd un indice variază, ceilalți rămîn constanți (la valorile prezumate).

3.1. INFLUENȚA COSTULUI SPECIFIC AL MATERIALULUI CONDUCTOR (ALUMINIU)

3.1.1. Prețul de cost anual al transformatorului „K" crește în limite restrînse cu costul specific al aluminiului; astfel creșterea de la simplu (25 lei/kg) la dublu (50 lei/kg) a costului aluminiului, conduce la variații ale costului transformatorului de 10,6% pentru $P_{scn} = 40$ kW și respectiv 4,1% pentru $P_{scn} = 120$ kW (fig. 1).

3.1.2. Din aceeași diagramă se vede că optimum tehnico-economic, respectiv costul minim al transformatorului crește pe măsură ce costul specific al aluminiului crește și corespunde unor valori ale puterii de scurtcircuit de asemeni crescătoare între limitele $P_{scn} = 58$kW pentru $m_{Al} = 25$ lei/kg și $P_{scn} = 65$ kWpentru $m_{Al} = 50$ lei/kg.

3.1.3. În figura 2, se reprezintă factori de siluetă x și y funcție de costul specific al aluminiului pentru diferite valori ale puterii de scurtcircuit. Raportul dintre înălțimea și lățimea ferestrei x variază practic liniar cu costul aluminiului, caracteristica $x = f(m_{Al})$ avînd aceeași pantă pentru diferitele valori ale puterii de scurtcircuit și scade pe măsură

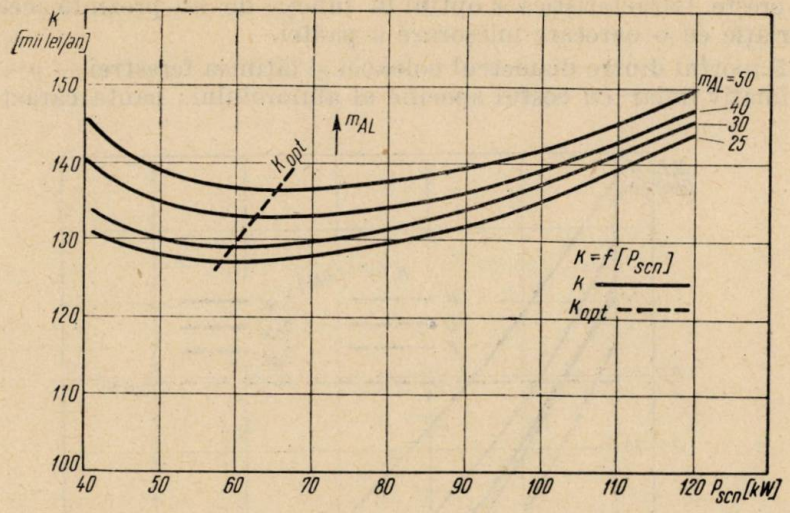


Fig. 1. — Costul anual al transformatorului, funcție de pierderile de scurt-circuit pentru m_{Al} parametru ce ia valori între 25 și 50 lei/kg.

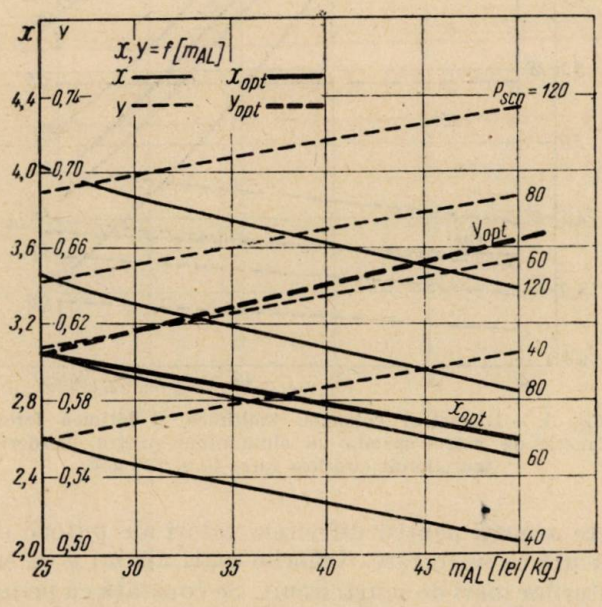


Fig. 2. — Factorii de siluetă x și y funcție de costul specific al aluminiului pentru pierderi de scurtcircuit cuprinse între 40 și 120 kW.

ce m_{Al} crește. Caracteristica x optim în funcție de m_{Al} prezintă aceeași lege de variație cu o oarecare micșorare a pantei.

Raportul dintre diametrul coloanei și lățimea ferestrei — y — variază aproximativ liniar cu costul specific al aluminiului; panta caracteristicii

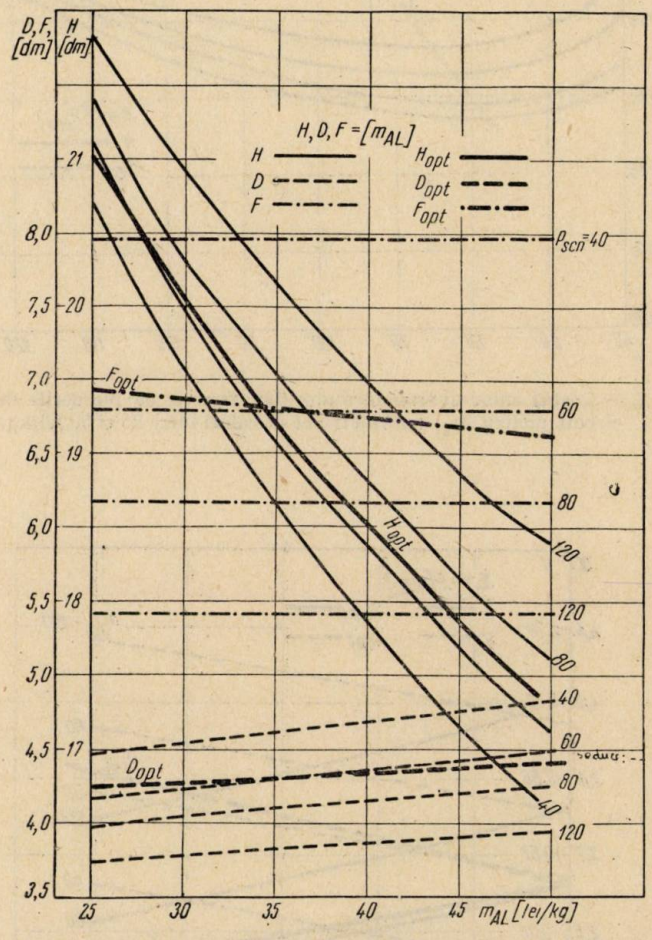


Fig. 3. — Diametrul coloanei, înălțimea și lățimea ferestrei funcție de costul specific al aluminiului pentru pierderi de scurtcircuit cuprinse între 40 și 120 kW.

$y = f(m_{Al})$ este aceeași pentru diferitele valori ale puterii de scurtcircuit; y crește pe măsură ce m_{Al} crește. Valorile mari ale lui y ca și în cazul lui x corespund puterilor mari de scurtcircuit. Se constată că pe măsură ce costul specific al aluminiului crește, transformatorul scade în înălțime și crește în ceea ce privește diametrul coloanei. Caracteristica y pentru costul minim funcție de m_{Al} prezintă aceeași lege de variație cu oarecare creștere a pantei.

3.1.4. În figura 3 sînt reprezentate lățimea și înălțimea ferestrei — F, H și diametrul coloanei D — funcție de costul specific al aluminiului m_{Al} pentru diferite puteri de scurtcircuit.

S-au reprezentat de asemenea valorile acestor dimensiuni care corespund costului anual minim.

Lățimea ferestrei rămîne constantă în funcție de m_{Al} fiind determinată doar de valoarea pierderilor de scurtcircuit. Lățimea ferestrei corespunzătoare costului anual minim, scade ușor cu creșterea lui m_{Al}, variația fiind liniară. Înălțimea ferestrei scade relativ mult cu creșterea costului specific al aluminiului.

Înălțimea ferestrei pentru transformatorul cel mai economic are aproximativ aceeași variație.

Diametrul coloanei crește ușor (6—7 %) aproape liniar pentru aceleași limite de variație a costului specific la aluminiu. Diametrul optim corespunzător transformatorului cu cost anual minim urmează aceeași lege de variație, creșterea fiind mai mică (3—4 %).

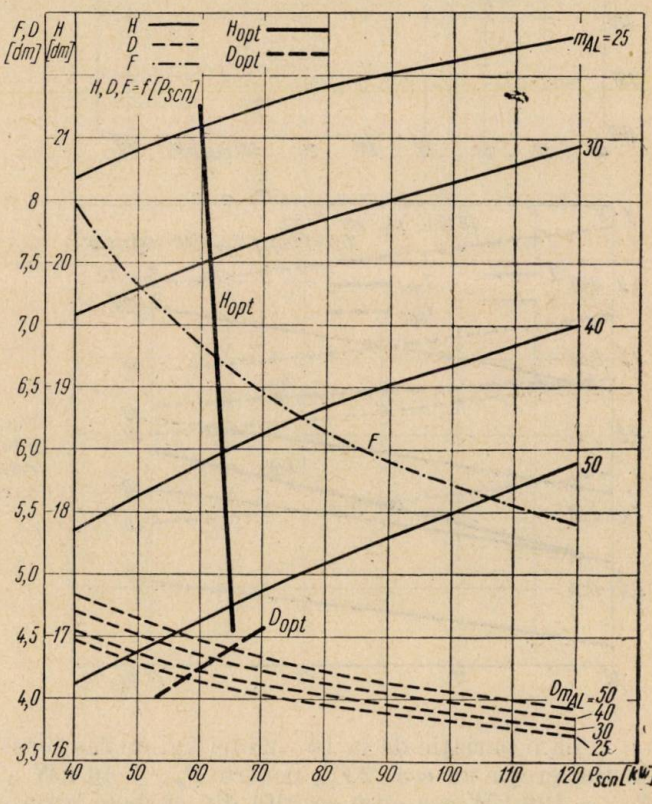


Fig. 4. — Diametrul coloanei, înălțimea și lățimea ferestrei, funcție de pierderile de scurtcircuit pentru m_{Al} parametru și ia valori cuprinse între 25 și 50 lei/kg.

Figura 4 scoate în evidență modul în care dimensiunile principale analizate mai sus variază cu pierderile de scurtcircuit la diferite valori ale costului specific al aluminiului.

3.2. INFLUENȚA COSTULUI SPECIFIC AL OȚELULUI ELECTROTEHNIC (TABLĂ SILICIOASĂ LAMINATĂ LA RECE)

3.2.1. Prețul de cost anual al transformatorului crește o dată cu costul specific al fierului.

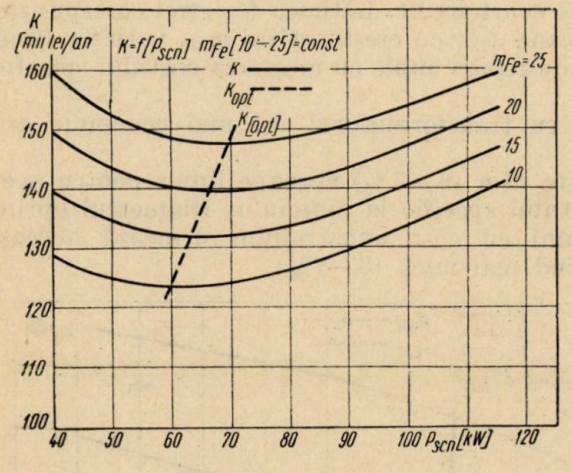


Fig. 5. — Costul anual al transformatorului, funcție de pierderile de scurtcircuit pentru m_{Fe} parametru ce ia valori cuprinse între 10 și 25 lei/kg.

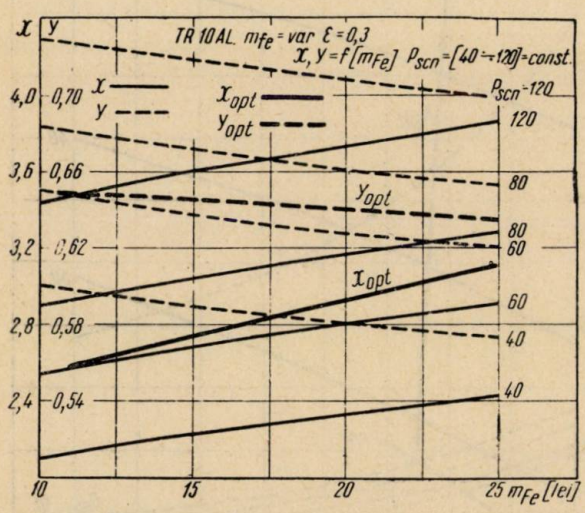


Fig. 6. — Factorii de siluetă x și y funcție de costul specific al fierului la P_{scn} parametru și ia valori cuprinse între 40 și 120 kW.

La o variație de la 10—25 lei/kg. de fier, costul anual al transformatorului crește cu cca. 23% pentru $P_{scn} = 40$ kW și numai cu 14% pentru $P_{scn} = 120$ kW așa cum rezultă din curbele trasate în figura 5.

3.2.2. Tot în figura 5, se poate vedea că transformatorul cu cost anual minim se scumpește o dată cu creșterea costului specific al fierului și anume cu aproximativ 18% pentru aceleași limite de variație ale lui m_{Fe}

Optimul tehnico-economic se situează între valori ale lui P_{scn} de 60—70 kW.

3.2.3. Sensul de variație al factorilor de siluetă x și y funcție de costul specific al fierului, este așa cum era de așteptat, opus sensului lor de variație, ca funcție de costul aluminiului. Astfel raportul — x — crește o dată cu m_{Fe} așa cum se vede în figura 6. Caracteristicile sînt aproape liniare și au aceleași pante pentru diferitele valori ale lui P_{scn}.

Raportul y variază de asemenea aproape liniar și scade cu creșterea costului specific al fierului.

Rezultă deci că cu creșterea costului specific al fierului transformatorului devine mai suplu.

3.2.4. La fel ca în cazul în care variază m_{Al} lățimea ferestrei (vezi fig. 7) nu depinde de costul specific, al fierului, ci numai de pierderile de scurtcircuit. Înălțimea ferestrei crește o dată cu m_{Fe}. Pentru transformatorul cel mai economic înălțimea ferestrei H variază aproximativ după aceeași lege.

Diametrul coloanei în mod firesc scade o dată cu creșterea prețului de cost al oțelului electrotehnic.

Modul în care pierderile de scurtcircuit adoptate influențează asupra dimensiunilor principale ale transformatorului sînt ilustrate în figura 8, din care rezultă o scădere a lățimei ferestrei cu creșterea acestor pierderi.

Înălțimea ferestrei crește cu puterea de scurtcircuit pentru diversele prețuri specifice ale fierului; variația mai mare corespunde unui preț specific mai mic. În condiții egale înălțimea ferestrei transformatorului celui mai economic, crește mult cu pierderile de scurtcircuit. Din figură se poate remarca modul în care diametrul coloanei scade o dată cu creșterea lui P_{scn}; este trasată de asemenea variația diametrului coloanei corespunzătoare transformatorului optim.

3.3. INFLUENȚA TIMPULUI DE RECUPERARE NORMAT—i

3.3.1. Timpul de recuperare are o influență considerabilă asupra prețului de cost anual al transformatorului și de aceea precizarea acestui indice este hotărîtoare. Din punctul de vedere al pierderilor de scurtcircuit însă pentru care acest cost e minim, pentru un număr de ani de recuperare variind de la simplu la triplu, pierderile variază în limite strînse, așa cum se poate vedea în fig. 9.

3.3.2. Limitele de variație ale costului transformatorului ca funcție de timpul de recuperare, rămîn proporțional aceleași indiferent de pierderile de scurtcircuit nominale adoptate.

3.3.3. În figura 10 se ilustrează modul în care factorii de siluetă x și y depind de timpul de recuperare normat.

Raportul $x = \frac{H}{F}$ crește cu 6% pentru $P_{scn} = 120$ kW și cu 8% pentru $P_{scn} = 60$ kW cînd timpul de recuperare variază între 4 și 12 ani.

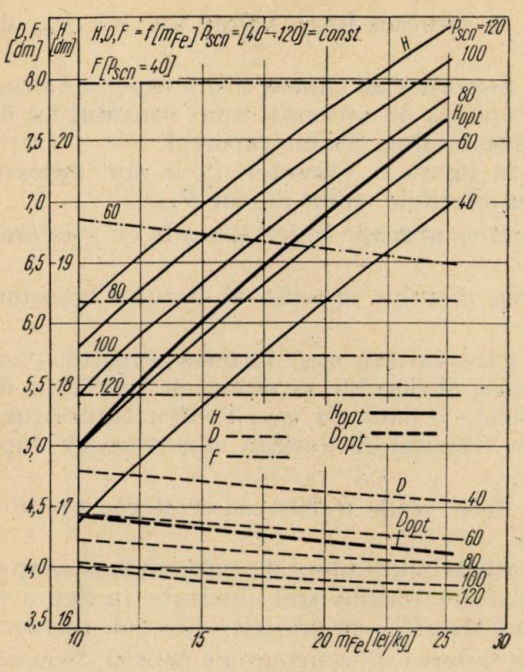


Fig. 7. — Diametrul coloanei, înălțimea și lățimea ferestrei funcție de costul specific al fierului, pentru P_{scn} ca parametru ce ia valori cuprinse între 40 și 120 kW.

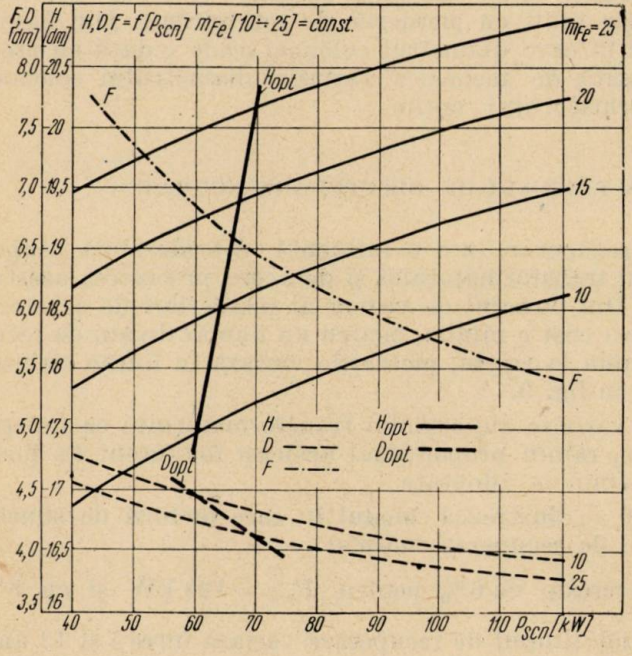


Fig. 8. — Diametrul coloanei, înălțimea și lățimea ferestrei funcție de pierderile de scurt-circuit pentru costul specific al fierului ca parametru și ia valori cuprinse între 10 și 25 lei/kg.

Raportul $y = \frac{D}{F}$, este puțin sensibil la variațiile lui i și P_{scn}. Rezultă deci, că în măsura în care se consideră un timp de recuperare mai îndelungat transformatorul devine mai înalt și se subțiază.

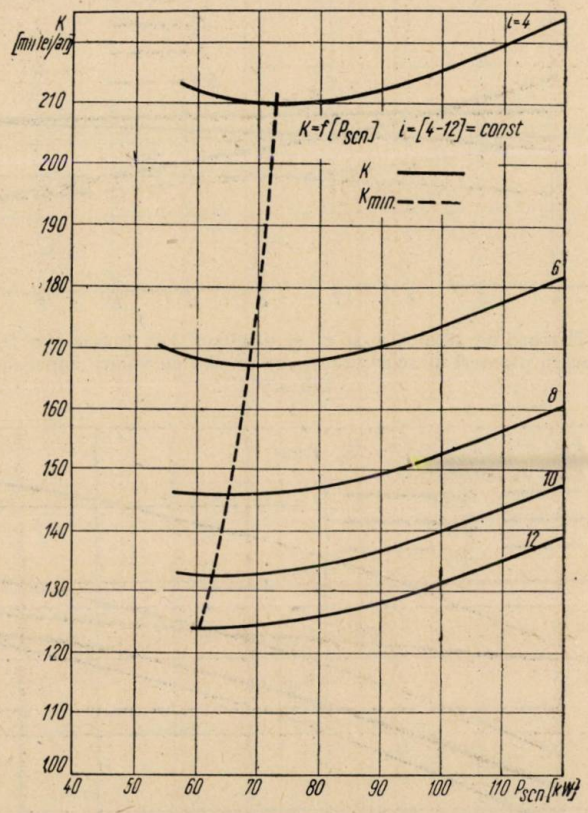


Fig. 9. — Costul anual al transformatorului funcție de pierderile de scurtcircuit pentru timpul de recuperare ca parametru avînd valori cuprinse între 4 și 12 ani.

3.3.4. Figura 11 reprezintă modul în care numărul de ani de recuperare influențează asupra dimensiunilor principale F, H, D. La pierderi de scurtcircuit nominale date, lățimea ferestrei se păstrează constantă, independent de timpul de recuperare normat, dar pentru transformatorul cel mai economic F crește.

Înălțimea ferestrei H crește o dată cu timpul de recuperare.

Pentru transformatorul optim H crește. De notat că creșterea este mai rapidă în intervalul de variație a timpului de recuperare corespunzător numărului mai mic de ani.

La P_{scn} = constant diametrul coloanei variază relativ puțin cu timpul de recuperare.

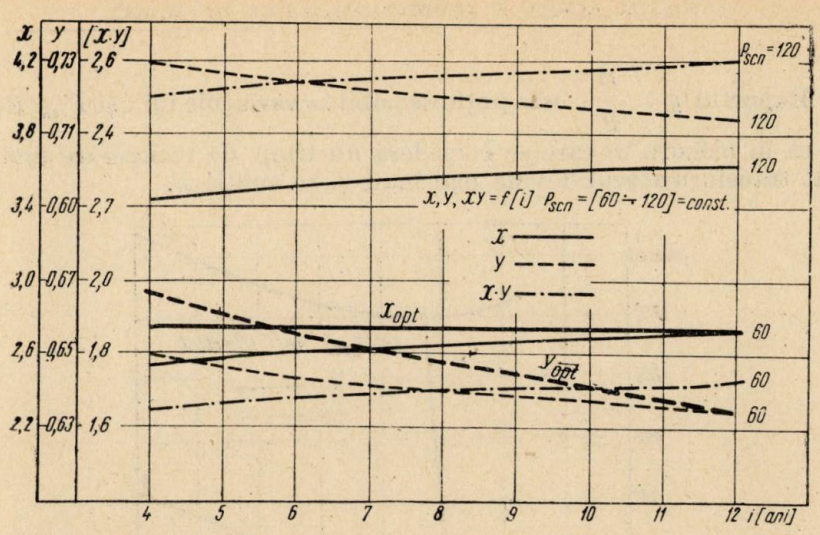


Fig. 10. — Factorii de siluetă x și y, și produsul lor, funcție de timpul de recuperare pentru pierderi de scurtcircuit parametru cu valori cuprinse între 60 și 120 kW.

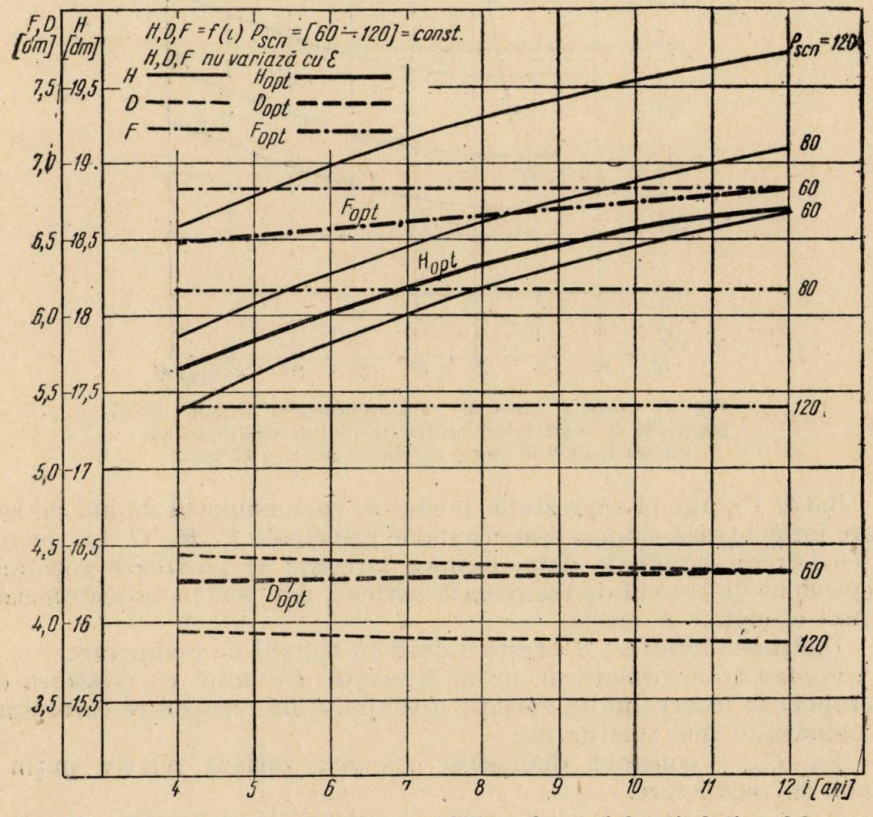


Fig. 11. — Diametrul coloanei, înălțimea și lățimea ferestrei, funcție de timpul de recuperare, pentru pierderi de scurtcircuit parametru ce ia valori între 40 și 120 kW.

Pentru transformatorul optim la inducția constantă la 1,65 T diametrul coloanei crește cu timpul de recuperare.

Variația dimensiunilor principale ale transformatorului funcție de P_{scn} la diferite valori ale timpului de recuperare, rezultă din figura 12.

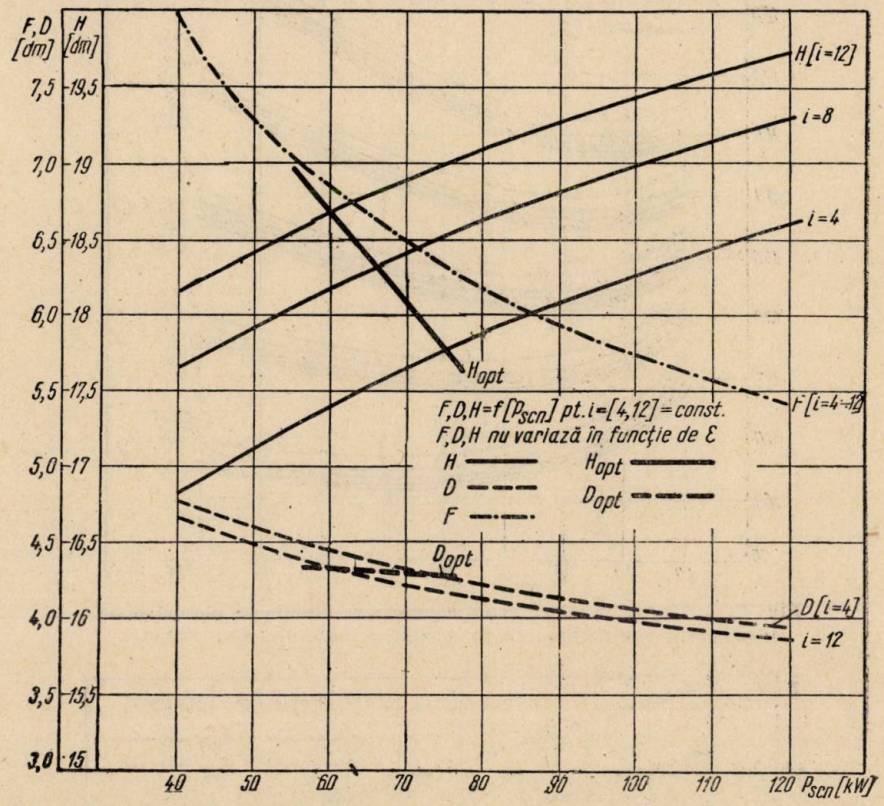


Fig. 12. — Diametrul coloanei, înălțimea și lățimea ferestrei funcție de pierderile de scurtcircuit, pentru timpul de recuperare parametru.

Lățimea ferestrei variază funcție de P_{scn} la fel ca în cazurile precedente, ea nedepinzînd de timpul de recuperare. Înălțimea ferestrei crește cu pierderile de scurtcircuit; diametrul urmează aceeași variație cu creșterea lui P_{scn} ca și în cazul celorlalți indici analizați și anume scade. Figura cuprinde și curbele de variație ale lui H_{opt} și D_{opt} pentru transformatorul cu cost minim.

3.4. INFLUENȚA INDUCȚIEI DIN COLOANĂ — B_a

3.4.1. Asupra costului anual al transformatorului inducția B_a are o influență destul de redusă, așa cum se poate vedea din figura 13, în care s-a reprezentat acest cost funcție de pierderile de scurtcircuit nominale pentru diferite inducții și diferiți factori.

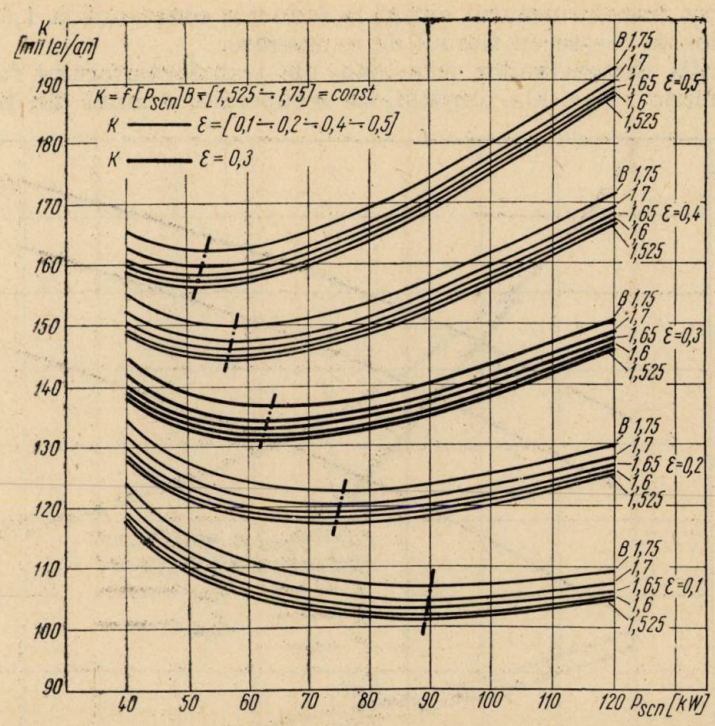


Fig. 13. — Costul anual al transformatorului, funcţie de pierderile de scurtcircuit pentru inducţia în coloană şi factorul ε ca parametri.

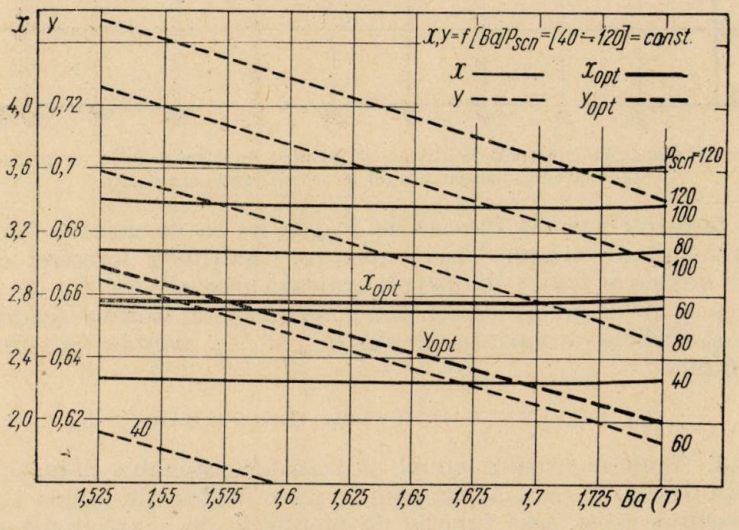


Fig. 14. — Factorii de siluetă x şi y funcţie de inducţia în coloană pentru P_{scn} parametru.

De asemenea se constată că pierderile de scurtcircuit pentru care costul anual e minim, nu depind aproape de loc de inducția adoptată.

Figura 13 ne conduce la concluzia că inducțiile mici conduc la costuri totale anuale mai reduse.

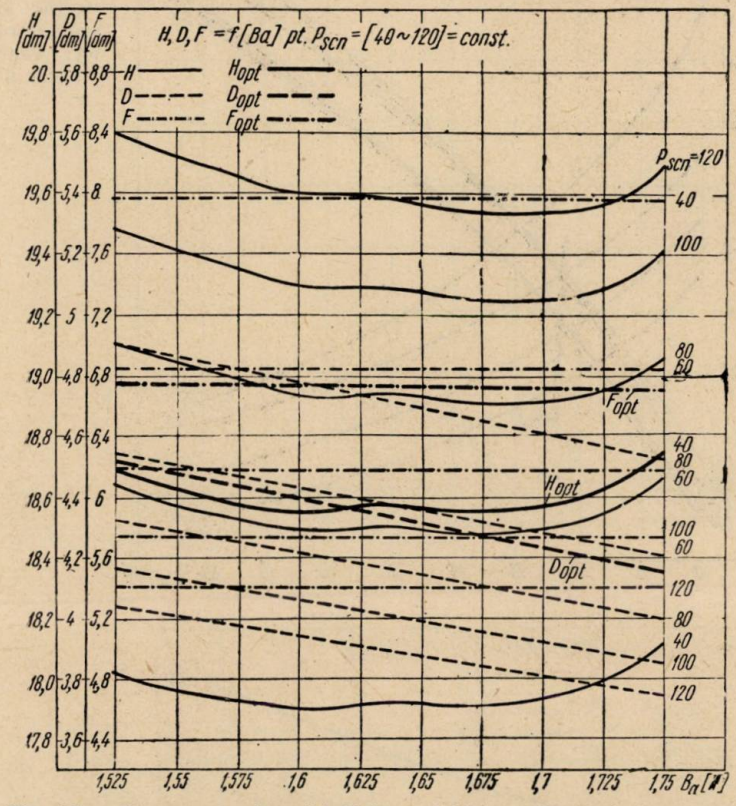


Fig. 15. — Diametrul coloanei înălțimea și lățimea ferestrei, funcție de inducția în coloană pentru pierderile de scurtcircuit parametru.

3.4.2. Costul anual al transformatorului după cum reiese din figura 13, variază sensibil și neliniar funcție de P_{scn} în mod diferit pentru fiecare ε. Alura curbelor este însă la un ε dat cam același pentru orice inducție.

3.4.3. Influența pe care inducția B_a o are asupra proporțiilor transformatorului rezultă din figura 14. Raportul $x = \frac{H}{F}$ rămîne aproape constant prezentînd o valoare minimă la B_a în jur de 1,625...1,65 T.

Pentru extremele alese ale lui B_a valoarea lui x crește față de acest minim cu mai puțin de 1%.

Rezultă că proporțiile ferestrei rămîn constante și cum F nu depinde de B_a rezultă că înălțimea H a ferestrei de asemenea nu depinde de B_a decît într-o foarte mică măsură.

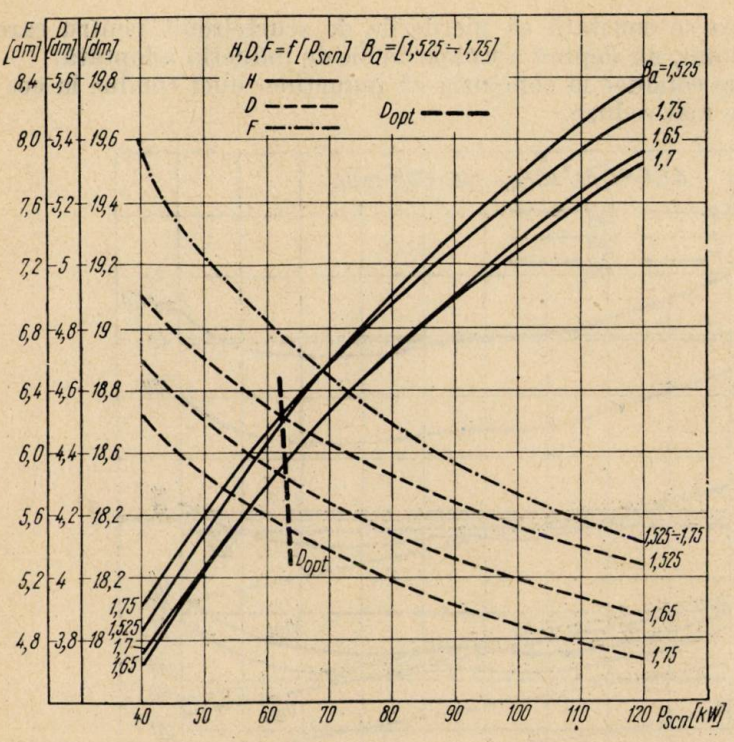


Fig. 16. — Diametrul coloanei, înălțimea și lățimea ferestrei, funcție de pierderile de scurtcircuit, pentru inducția în coloană, parametru ce ia valori cuprinse între 1,525 și 1,750 *T*.

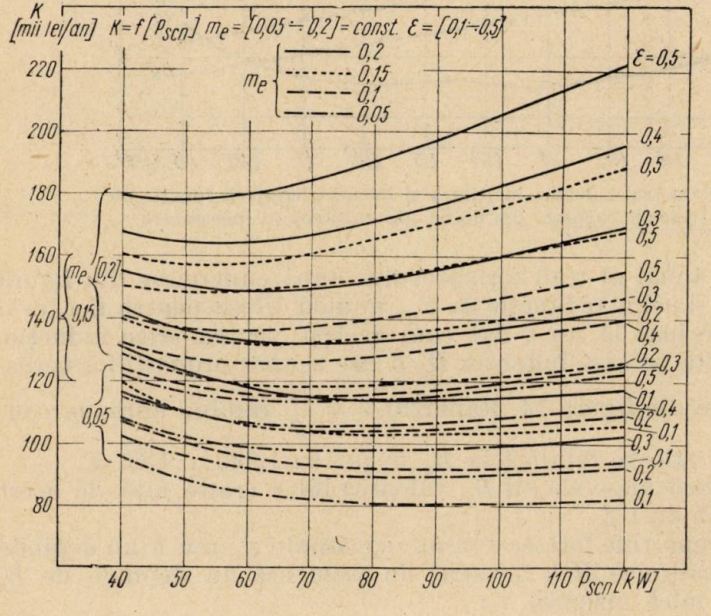


Fig. 17. — Costul anual al transformatorului, funcție de pierderile de scurtcircuit pentru costul specific al energiei electrice și factorul ε parametri.

Raportul $y = D/F$ variază în măsură mai mare cu inducția; variația este liniară și pe măsură ce B_a crește y scade. Rezultă la F constant o subțiere a diametrului cu creșterea inducției ceea ce era și de așteptat.

3.4.4. Modul în care variază dimensiunile principale F, D, H funcție de B_a este redat în figura 15.

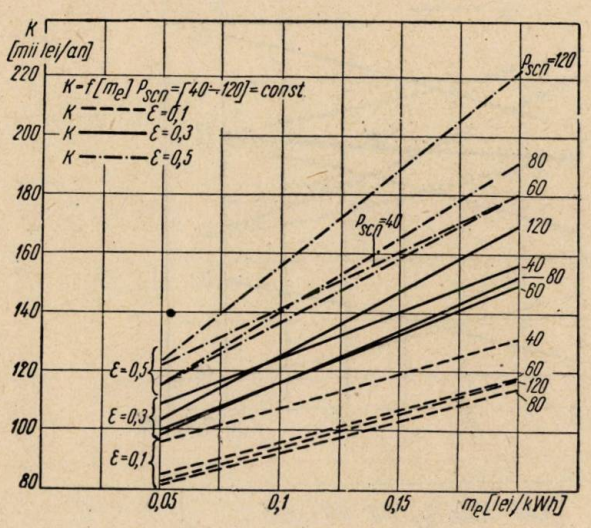


Fig. 18. — Costul anual al transformatorului, funcție de costul specific al energiei electrice pentru P_{scn} și ε parametri.

Figura 16, prezintă variația dimensiunilor principale funcție de P_{scn} pentru diferite inducții. Lățimea ferestrei F are aceeași variație ca și în cazul celorlalți indici variabili nedepinzînd decît de P_{scn}; H crește cu pierderile de scrutcircuit iar diametrul scade.

3.5. INFLUENȚA COSTULUI SPECIFIC AL ENERGIEI ELECTRICE

3.5.1. Prețul de cost anual K al transformatorului, crește o dată cu costul specific al energiei electrice în limite mai restrînse pentru valori mici ale pierderilor de scurtcircuit — și în limite mai mari pentru valori mari ale pierderilor de scurtcircuit. În figura 17 sînt trasate curbele $K = f(P_{scn})$ pentru diferite valori ale prețului specific al energiei electrice— la diferiți timpi echivalenți de utilizare a puterii maxime.

3.5.2. Din aceeași diagramă se poate vedea că minimul costului anual al transformatorului crește ca valoare pe măsură ce costul specific al energiei electrice crește și cu atît mai mult cu cît timpul echivalent de utilizare — ε — este mai mare.

În figura 18 sînt reprezentate familiile de curbe $K = f(m_e)$ pentru diferite valori ale lui ε și ale lui P_{scn}. Variația lui K este liniară și în același sens cu variația lui m_e și este cu atît mai mare cu cît ε este mai mare și cu

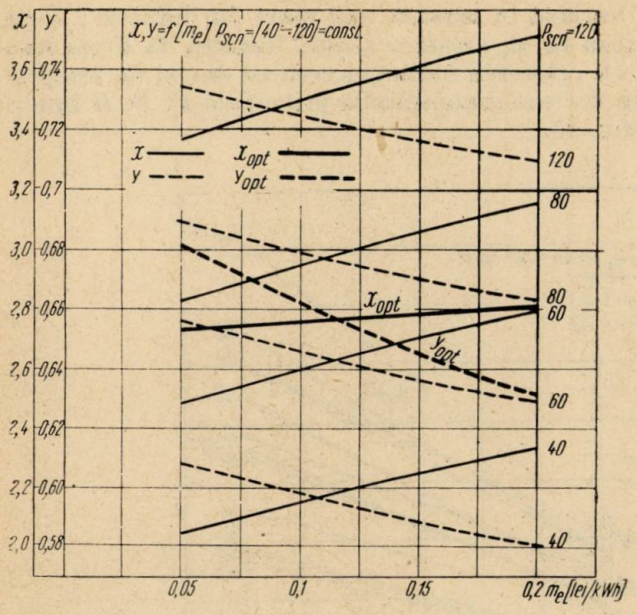


Fig. 19. — Factorii de siluetă x și y, funcție de costul specific al energiei electrice, pentru P_{scn} parametru ce ia valori cuprinse între 40 și 120 kW.

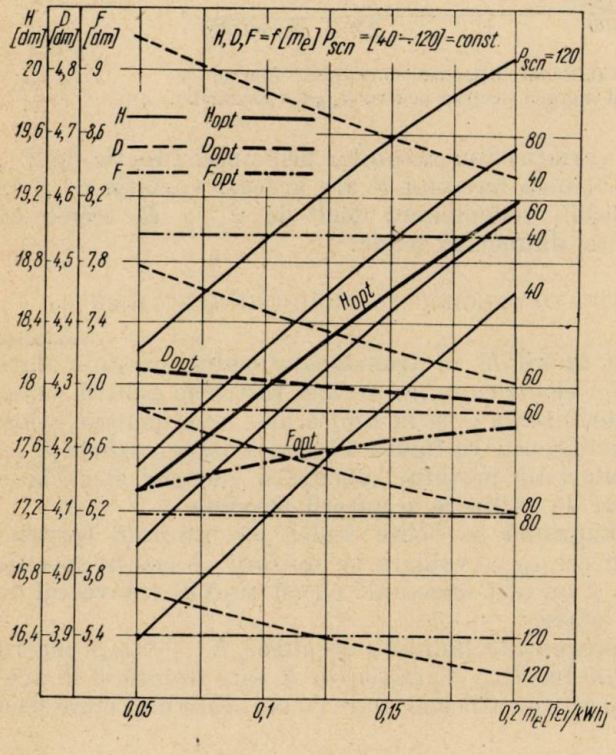


Fig. 20. — Diametrul coloanei, înălțimea și lățimea ferestrei funcție de costul specific al energiei electrice, pentru P_{scn} parametru cu valori cuprinse între 40 și 120 kW.

atît mai intensă cu cît valoarea lui P_{scn} este de asemenea mai mare. Deci panta caracteristicilor va fi cu atît mai mare cu cît ε și P_{scn} vor avea valori mai mari.

3.5.3. Sensul de variație al factorilor de siluetă x și y, funcție de costul specific al energiei electrice corespunde sensului obținut prin variația costului specific al fierului.

În figura 19, s-au reprodus curbele x și $y = f(m_e)$ pentru $P_{scn} = 40$ și 120 kW.

Se constată astfel, că raportul — x — crește o dată cu m_e; caracteristicile sînt practic liniare și pentru diferite valori ale pierderilor de scurt-circuit — paralele.

Raportul y variază liniar și scade cu creșterea costului specific al energiei electrice; pentru diferite valori ale lui P_{scn} caracteristicile $y = f(m_e)$ sînt paralele. Rezultă deci că pe măsură ce costul specific al energiei electrice scade, transformatorul optim tinde să devină mai scund.

3.5.4. Aceeași concluzie se poate trage și din interpretarea curbelor H, F, și $DF = f(m_e)$ prezentate în figura 20, unde se observă că lățimea ferestrei nu e funcție de costul specific al energiei electrice, iar H crește și D scade pe măsură ce m_e crește.

4. INFLUENȚA INDICILOR TEHNICO-ECONOMICI ȘI A INDUCȚIEI ASUPRA PIERDERILOR P_0 (ACTIVE) ȘI Q_0 (REACTIVE) DE MERS ÎN GOL ȘI ASUPRA COSTULUI MATERIALELOR ACTIVE ÎN TRANSFORMATORUL GATA CONFECȚIONAT

În cele ce urmează se analizează pentru diferitele puteri de scurt-circuit, influența pe care o au acești indici asupra pierderilor de mers în gol și asupra costului materialelor active M ale transformatorului.

Prezintă interes îndeosebi influența asupra costului M întrucît acesta dă indicații asupra contribuției pe care o are partea ce revine industriei producătoare de transformatoare față de costul total al transformatorului.

4.1. INFLUENȚA ASUPRA PIERDERILOR ACTIVE DE MERS ÎN GOL P_0

Din figura 21 se vede că costul unitar al fierului nu influențează decît foarte puțin asupra lui P_0 și anume cînd m_{Fe} crește, P_0 scade.

Prețul aluminiului (fig. 22) influențează în sens invers pierderile de mers în gol.

Influența inducției B_α asupra lui P_0 este ilustrată de figura 23. O dată cu creșterea inducției de la 1,525 la 1,75 T, cresc și pierderile active de mers în gol.

O dată cu creșterea costului unui kWh de energie la barele transformatorului P_0 scade aproape liniar (fig. 24).

În figura 25 se poate vedea că și la creșterea timpului de recuperare normal P_0 scade ușor.

Variația pierderilor active de mers în gol este mică în intervalul de la simplu la triplu al timpului de recuperare.

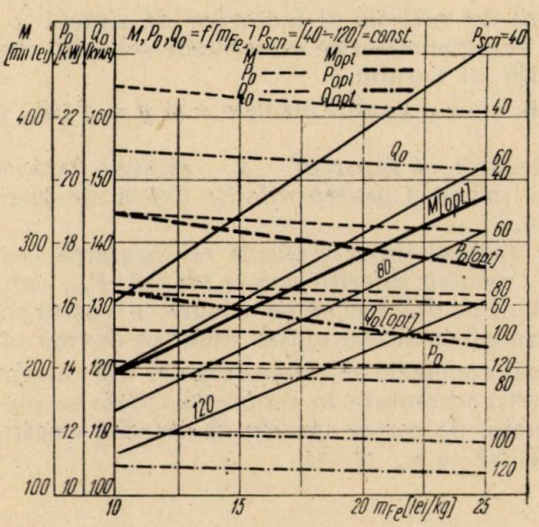


Fig. 21. — Costul materialelor active, pierderile active de mers în gol și puterea de magnetizare la mers în gol, funcție de costul specific al fierului, pentru P_{scn} parametru, cu valori cuprinse între 40 și 120 kW.

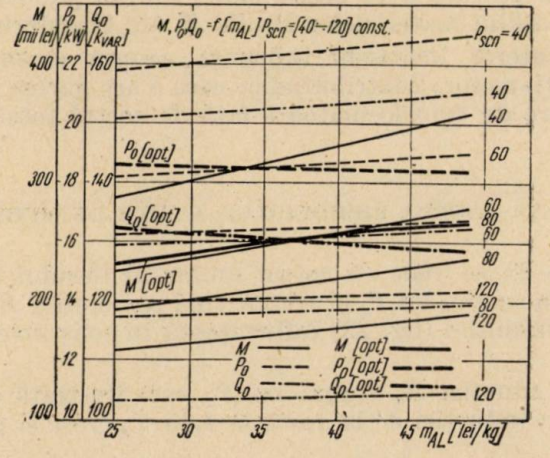


Fig. 22. — Costul materialelor active, pierderile active de mers în gol și puterea de magnetizare la mers în gol, funcție de costul specific al aluminiului pentru P_{scn} parametru, ce ia valori cuprinse între 40 și 120 kW.

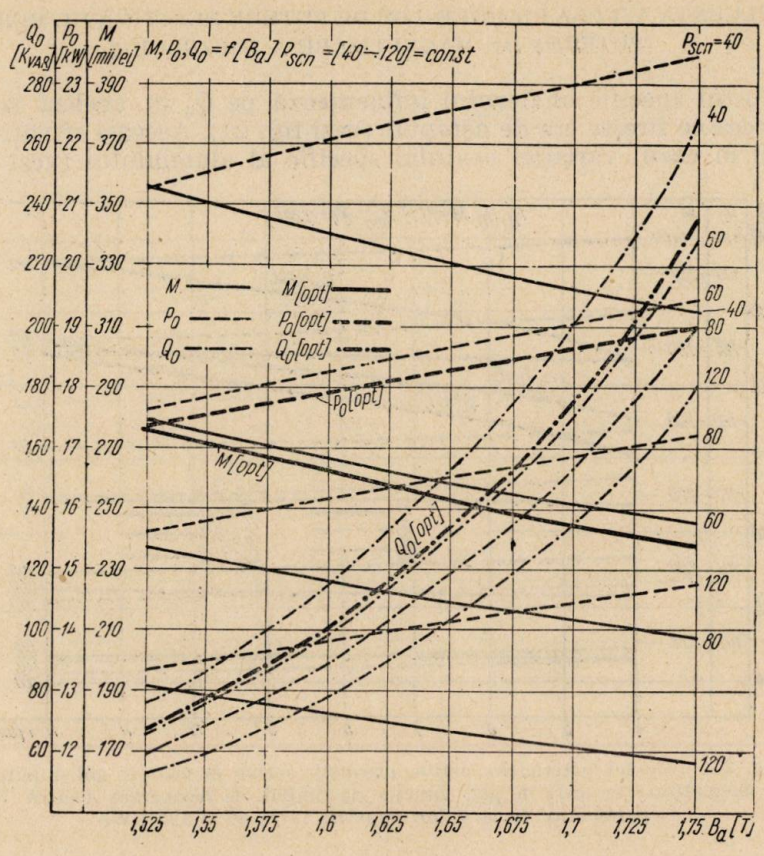


Fig. 23. — Costul materialelor active, pierderile active de mers în gol şi puterea de magnetizare de mers în gol, funcţie de inducţia în coloană, pentru P_{scn} parametru ce ia valori cuprinse între 40 şi 120 kW.

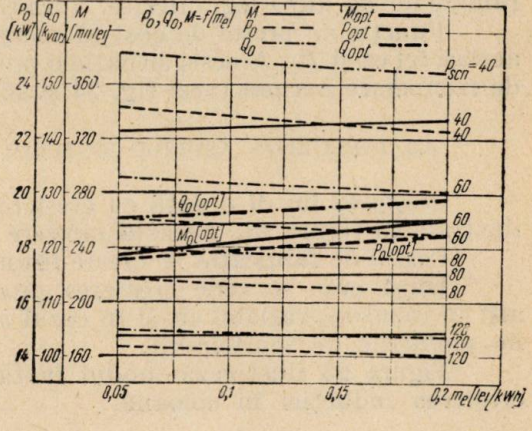


Fig. 24. — Costul materialelor active, pierderile active de mers în gol şi puterea de magnetizare de mers în gol, funcţie de costul specific al energiei electrice, pentru P_{scn} parametru ce ia valori cuprinse între 40 şi 120 kW.

4.2. INFLUENȚA ASUPRA PIERDERILOR DE PUTERE REACTIVĂ DE MERS ÎN GOL (PUTEREA DE MAGNETIZARE A MIEZULUI) Q_0

Costul specific al fierului influențează pe Q_0 în același sens ca și pe P_0 ceea ce firește era de așteptat (vezi fig. 21). Aceeași situație se prezintă și în cazul variației costului specific al aluminiului (vezi fig. 22).

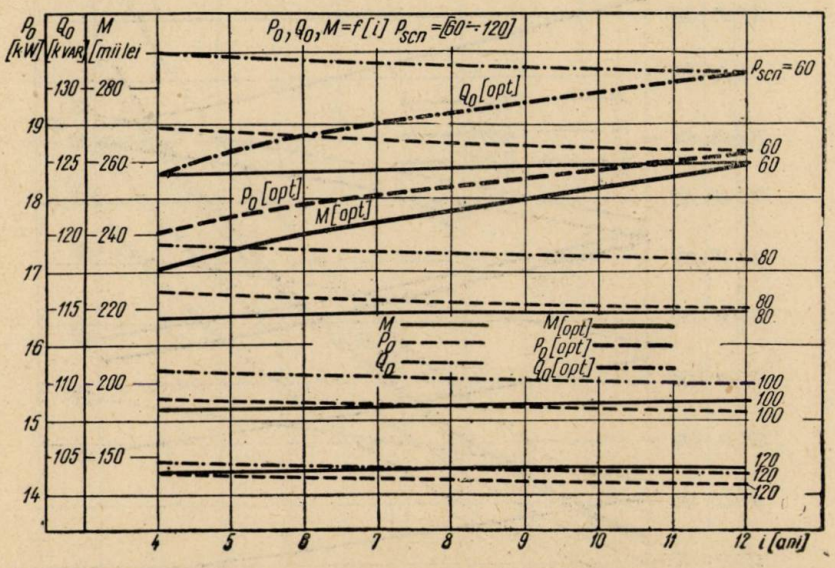


Fig. 25. — Costul materialelor active, pierderile active de mers în gol și puterea de magnetizare de mers în gol, funcție de timpul de recuperare pentru P_{scn} parametru ce ia valori cuprinse între 60 și 120 kW.

Influența inducției din coloană asupra puterii de magnetizare este diferită de cea asupra pierderilor active de mers în gol, ceea ce de asemenea era de așteptat întrucît pierderile specifice active și reactive variază funcție de B_a după legi diferite. Variația lui Q_0 nu este liniară.

Funcție de prețul de cost al energiei electrice la bare Q_0 variază în același fel ca și P_0. Aceeași situație o prezintă și în cazul variației timpului de recuperare normat (vezi fig. 24 și 25).

4.3. INFLUENȚA ASUPRA COSTULUI MATERIALELOR ACTIVE M

Creșterea lui M o dată cu creșterea costului specific al fierului este ilustrată în figura 21. Această creștere este liniară.

Costul de fabricație M crește firește și cu prețul aluminiului.

După cum se vede creșterea procentuală a costului de fabricație atît în cazul m_{Fe} variabil cît și în cazul m_{Al} variabil aproape că nu depinde de pierderile de scurtcircuit.

Figura 23 ilustrează modul în care costul de fabricație scade cu creșterea inducției în coloană.

Funcție de costul unui kWh la barele transformatorului costul de fabricație al transformatorului variază în limite destul de restrînse (fig. 24). O oarecare creștere suferă M și cu creșterea timpului de recuperare normat (fig. 25).

Se vede de aici că costul specific al energiei electrice și timpul de recuperare adoptat influențează în destul de mică măsură costul materialelor active uzinate.

5. INFLUENȚA INDICILOR TEHNICO-ECONOMICI ȘI INDUCȚIEI ASUPRA COMPONENTELOR PREȚULUI DE COST ANUAL

În metodele tehnico-economice prețul de cost anual constituie criteriul fundamental în determinarea soluției optime a oricărui utilaj. Soluția adoptată practic, de obicei diferă mai mult sau mai puțin de varianta optimă pe de o parte din motive obiective ce nu pot fi prinse în relațiile matematice utilizate, iar pe de altă parte datorită faptului că termenii ce intervin în prețul de cost anual are fiecare specificul său și permit o interpretare mai largă a rezultatelor:

5.1. INFLUENȚA COSTULUI SPECIFIC AL ALUMINIULUI

Ponderea fiecărui termen în prețul de cost anual cînd $\varepsilon = 0{,}3$ și toți ceilalți indici au valorile medii adoptate în calcule, este următoarea:

— termenul privind costul materialelor active raportat la un an e funcție de valoarea pierderilor de scurtcircuit și intervine cu o pondere ce variază între 19% (pentru $P_{scn} = 120$ kW) și 27,8% (pentru $P_{scn} = 40$ kW) iar pentru soluția optimă $\approx 30\%$; în general deci, o pondere însemnată;

— termenul privind costul pierderilor active la funcționarea în gol este de asemeni funcție de valoarea pierderilor de scurtcircuit și intervine cu o pondere cuprinsă între 17,0% ($P_{scn} = 120$ kW) și 28,6% (pentru $P_{scn} = 40$ kW) iar pentru soluția optimă $\approx 24\%$, deci o pondere apreciabilă;

— termenul privind costul pierderilor reactive la funcționarea în gol este de asemeni funcție de valoarea pierderilor de scurtcircuit și intervine cu o pondere ce variază între 3,4% ($P_{scn} = 120$ kW) și 5,3% ($P_{scn} = 40$ kW) deci o pondere neglijabilă;

— termenul privind costul pierderilor active la funcționarea în sarcină $-K_{p\varepsilon}$ funcție la rîndul său de pierderile de scurtcircuit, are o pondere ce variază între 50% ($P_{scn} = 120$ kW), și 17,1% ($P_{csn} = 40$ kW) iar pentru soluția optimă $\approx 30\%$, deci cu o pondere în general mare și care e mult influențată de P_{scn};

— termenul privind costul pierderilor reactive la funcționarea în sarcină — $K_{Q\varepsilon}$ — este independent de valoarea pierderilor de scurtcircuit și intervine cu o pondere cuprinsă între 10,6% ($P_{scn} = 120$ kW) și 11,1% ($P_{scn} = 40$ kW) iar pentru soluția optimă $\approx 11{,}7\%$ deci cu o pondere relativ mică (fig. 26).

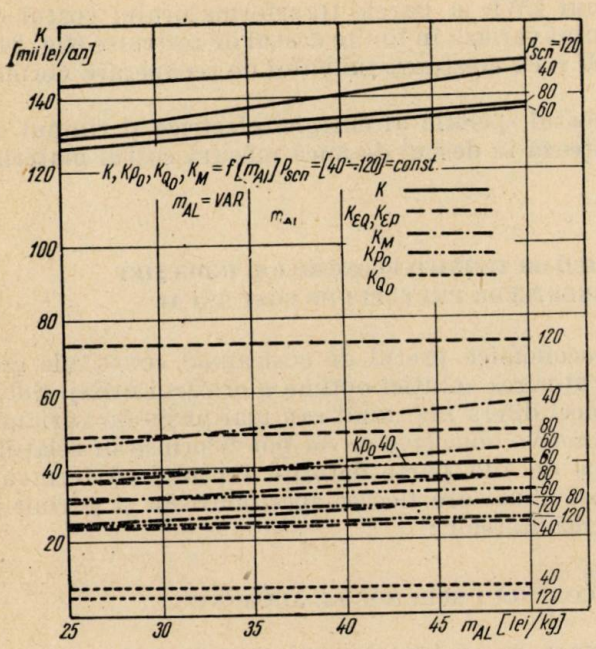


Fig. 26. — Componentele costului anual al transformatorului, funcţie de costul specific al aluminiului, pentru P_{scn} parametru.

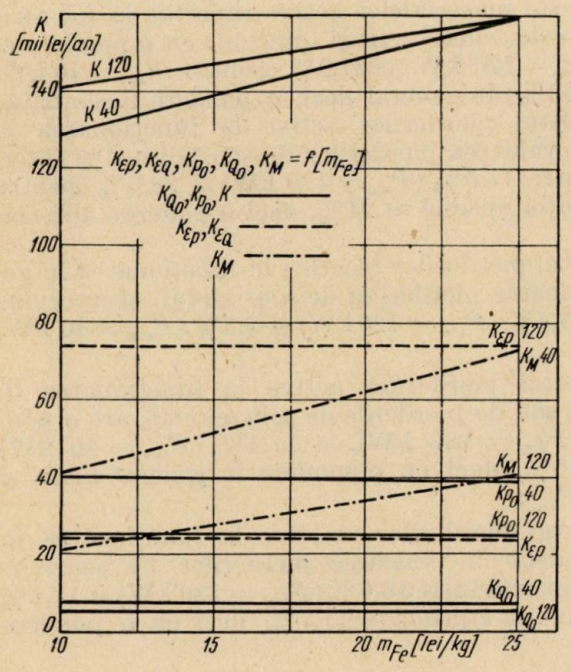


Fig. 27. — Componentele costului anual al transformatorului funcţie de costul specific al fierului, pentru P_{scn} parametru.

Costurile pierderilor active — K_{P_0} și reactive K_{Q_0} la funcționarea în gol și costurile pierderilor active $K_{P\varepsilon}$ și reactive — $K_{Q\varepsilon}$ — la funcționarea în sarcină practic rămîn constante cînd costul specific al aluminiului crește, ponderea lor variind în limite restrînse datorită variației costului materialelor active — K_M — raportat la un an din termenul de recuperare. Acest cost variază de la 35% la 38,6% cînd $P_{scn} = 40$ kW și de la 17% la 20,2% cînd $P_{scn} = 120$ kW deci are pondere mai mare și evoluează mai intens pentru valori mici ale pierderilor de scurtcircuit. Se impune deci cunoașterea precisă a costului real al aluminiului uzinat, atunci cînd se intenționează adoptarea unor soluții de transformatoare cu pierderi de scurtcircuit mici.

5.2. INFLUENȚA COSTULUI SPECIFIC AL FIERULUI

Costurile pierderilor active și reactive la funcționarea în sarcină rămîn practic constante, așa cum se constată și din figura 27, ponderea lor variind în costul anual datorită schimbării termenului de raportare — K— ; pentru $m_{Fe} = 15{,}5$ lei/kg ponderea fiecărui termen corespunde celei din 5.1.

Singurul termen care e influențat de costul specific al fierului este, după cum era și de așteptat K_M. În urma unei analize sumare a curbelor rezultă, ca necesar, ca și în cazul anterior analizat, cunoașterea precisă a costului specific al fierului uzinat în special atunci cînd se intenționează construirea de transformatoare cu pierderi de scurtcircuit reduse.

5.3. INFLUENȚA INDUCȚIEI

Valoarea inducției (fig. 28) nu influențează termenii ce se referă la costul anual al pierderilor de scurt circuit și al costului anual al pierderilor reactive ale cîmpului de scăpări în sarcină ; ceilalți termeni suferă schimbări. Astfel :

— K_M — scade uniform pe măsură ce inducția crește.

— K_{P_0} crește uniform pe măsură ce inducția crește indiferent de valoarea pierderilor de scurtcircuit.

— K_{Q_0} — crește tot mai mult cu creșterea inducției și în mod mai sensibil după 1,675—1,725 T. Ponderea costului pierderilor reactive de mers în gol e relativ mică în costul total anual, însă creșterile raportate la valorile inițiale sînt deosebit de importante.

★

Rezultă deci că pentru cazurile particulare de transformatoare conectate la rețea pe timp limitat, se poate merge la valori ridicate ale inducției. În rest, deci în cazul general, singura recomandare ce se poate face, ca urmare a schimbării pantei caracteristicilor $K_{Q_0} = f(B_a)$ din figura 28 mai pronunțate după $B_a = 1{,}7$ T și datorită faptului că variația lui K_{Q_0} este relativ neînsemnată pînă la această valoare, e ca să nu se depășească valoarea susamintită.

5.4. INFLUENȚA TIMPULUI DE RECUPERARE

Toți termenii din relația (1) sînt influențați mult de timpul de recuperare — i —, și variază neliniar dar în același sens. Astfel, cînd i ia valori de la 4 la 12 ani, din figura 29, unde s-au reprezentat (K_M, K_{p_0}, $K_{p\varepsilon}$, K_{Q_0},

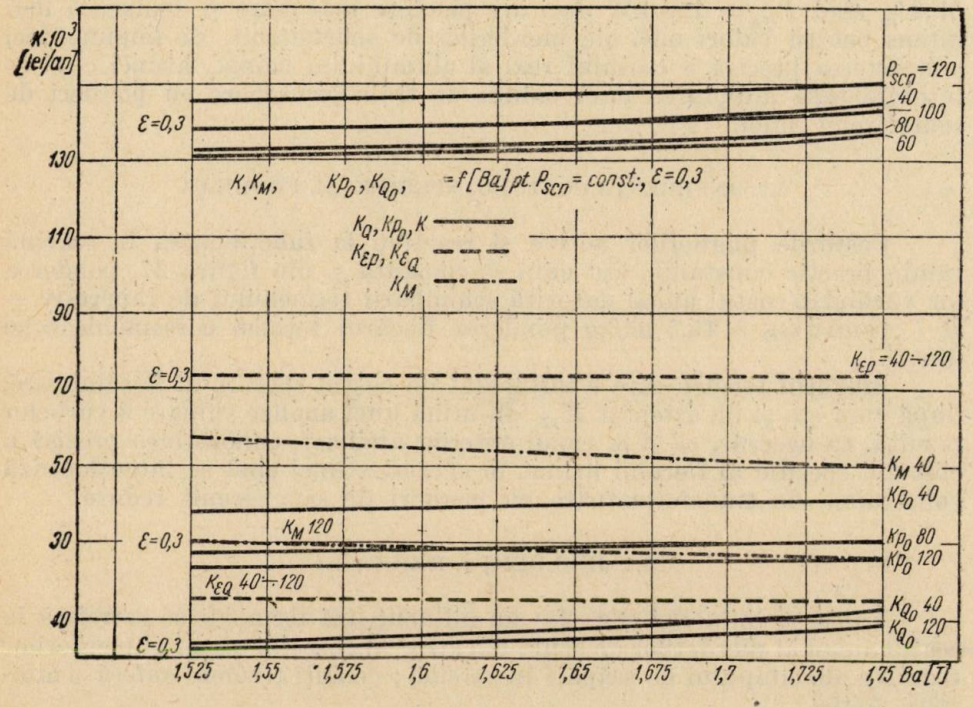


Fig. 28. — Componentele costului anual al transformatorului, funcție de inducția în coloană P_{scn} parametru.

$K_{Q\varepsilon} = f\ (i)$), pentru diferitele valori ale pierderilor de scurtcircuit constatăm următoarele :

— K_M — scade pe măsură ce termenul de recuperare crește ;

— K_{Q_0} — scade de asemeni în valori absolute însă ponderea lor în costul anual crește,

— K_{Q_0} — în valori absolute scade la mai mult de jumătate pentru toate cazurile pierderilor de scurtcircuit, însă ponderea lor în costul anual scade relativ puțin,

— $K_{p\varepsilon}$ — întocmai ca și K_{p_0} scade, în valori absolute, însă ponderea lor în costul anual al transformatorului crește,

— $K_{Q\varepsilon}$ — spre deosebire de toți ceilalți termeni ca valoare absolută nu depinde de valoarea pierderilor de scurtcircuit.

Rezultă deci că, deși asupra valorilor absolute timpul de recuperare —i— influențează în același sens, adică creșterea lui conduce la scăderea celor

cinci costuri anuale parțiale, totuși, asupra ponderii costurilor anuale parțiale în costul anual total influențează diferit; și anume: 1) scade ponderea termenilor ce reprezintă costul materialelor active, costul pierderilor reactive de mers în gol și costul pierderilor reactive de funcționare în sarcină și 2) creșterea ponderii termenilor ce reprezintă costul pierderilor

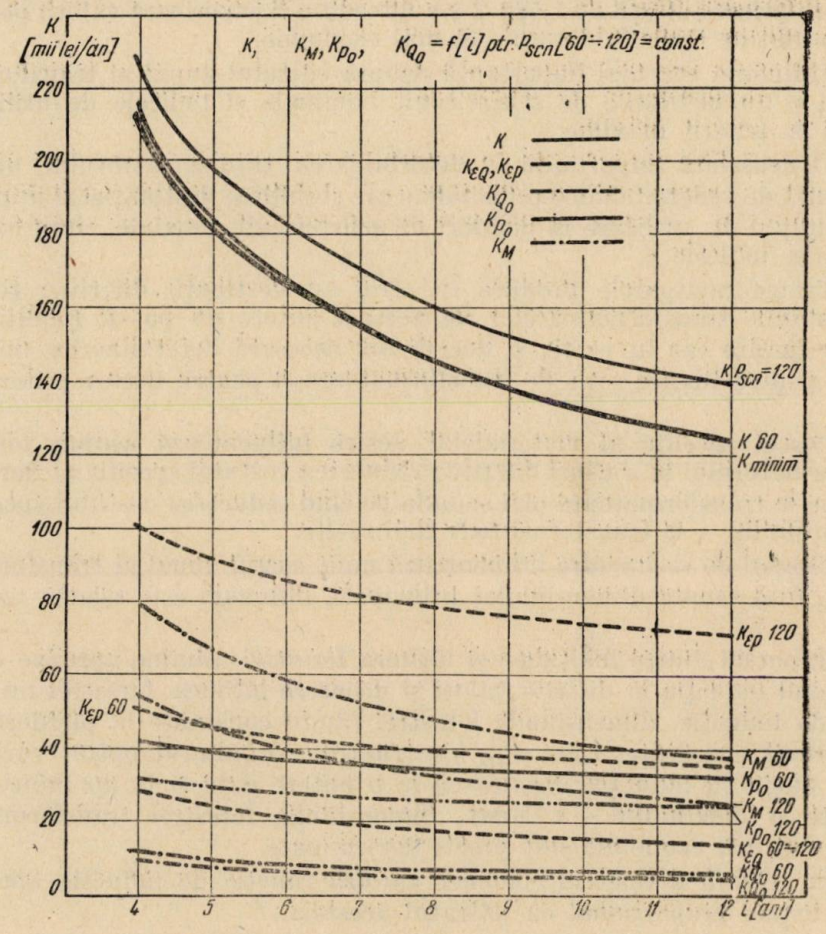


Fig. 29. — Componentele costului anual al transformatorului, funcție de termenul de recuperare. P_{scn} parametru.

active la mers în gol și costul pierderilor active la funcționarea în sarcină. Deci, pentru termene de recuperare restrînse, va trebui să analizăm mai atent, în special, costul materialelor active, pe cînd pentru termene de recuperare mai lungi, atenția va trebui îndreptată spre analizarea costurilor pierderilor active de mers în gol și în sarcină.

6. ÎNCHEIERE

Alegerea limitelor de variație a indicilor analizați, s-a arătat inspirată, ea îngăduind urmărirea influenței acestora la determinarea soluției optime a transformatorului, exceptînd cazul inducției în coloană la care limita inferioară aleasă de 1,525 T s-a dovedit a fi superioară valorii pentru care se obține transformatorul cel mai economic.

Influența cea mai importantă asupra costului anual al transformatorului o au pierderile de scurtcircuit nominale și indicele de utilizare anuală a puterii maxime.

O deosebită importanță în determinarea transformatorului optim din punct de vedere tehnico-economic o are stabilirea destinației și implicit deci, timpul de utilizare la pierderi de scurtcircuit maxime, timp exprimat prin indicele ε.

Transformatoarele produse în serie au destinații diferite; totuși dimensiunile transformatoarelor de aceeași putere nu pot fi modificate pentru fiecare caz în parte, și deci devine necesară determinarea unui ε mediu pentru fiecare serie de transformatoare și pentru fiecare putere în parte.

Costul specific al materialelor active influențează asupra formei transformatorului în sensuri diferite; reducerea costului specific al fierului conduce la transformatoare mai scunde pe cînd reducerea costului specific al aluminiului — la transformatoare mai svelte.

Timpul de recuperare influențează mult costul anual al transformatorului, însă asupra dimensiunilor principale, influența este relativ moderată.

Raportul dintre înălțimea și lățimea ferestrei, rămîne aproape constant cînd inducția ia diferite valori și deoarece lățimea ferestrei nu depinde de inducție, dimensiunile ferestrei rămîn constante la pierderi de scurtcircuit constante. Cum P_{scn} pentru transformatorul optim variază foarte puțin cu inducția, rezultă că la o putere dată și la un indice de utilizare a maximului — ε — dat, dimensiunile ferestrei transformatorului celui mai economic sînt precis determinate.

În schimb diametrul coloanei variază funcție de inducție aproximativ invers proporțional cu pătratul acesteia.

Costul specific al energiei electrice influențează sensibil costul anual al transformatorului. În aceeași măsură este influențată și valoarea pierderilor de scurtcircuit corespunzătoare transformatorului cu cost anual minim; influența e cu atît mai mare, cu cît indicele corespunzător timpului echivalent de utilizare a transformatorului la puterea maximă e mai mare. Factorii de siluetă suferă modificări în sensul înălțimii și subțierii transformatorului pe măsură ce costul specific al energiei electrice crește.

În cazul în care se urmărește construirea unor transformatoare cu pierderi de scurtcircuit mici, pentru determinarea dimensiunilor principale prezintă importanță deosebită cunoașterea cît mai precisă a costului specific real al materialelor active. Dacă însă se urmărește construirea unor transformatoare cu pierderi de scurtcircuit mai mari, atenția deosebită va fi îndreptată asupra cunoașterii precise a costului specific al energiei electrice, al indicelui corespunzător timpului de utilizare a puterii maxime și a investițiilor suplimentare în centrală, pentru acoperirea pierderilor active.

Anexa 1

Formulele de calcul utilizate şi notaţiile respective

Nr. crt.	Formulele de calcul	Notaţii utilizare	Valori admise		Unităţi
			Limitele admise	Valoarea prezumată	
1	$\frac{U_r}{U_a} \cong \frac{U_{sc}}{100} \frac{S_n}{P_{scn}}$	U_r — tensiunea de dispersie U_a — căderea activă de tensiune U_{sc} — tensiunea de scurtcircuit S_n — puterea nominală P_{scn} — pierderile de scurtcircuit nominale	 40—120	 10,5 10 000 	 % kW kW
2	$K_1 = 0{,}463 \frac{U_r \cdot 100 \cdot \tau \cdot \alpha}{U_a \cdot 2f \cdot \lambda \cdot \beta \cdot K_{Al} \cdot K_z}$ pentru aluminiu	f — frecvenţa $\tau = 1 + \frac{t}{160}$ t — treptele de reglaj a tensiunii $\beta = \frac{D_{i1} + D_{a2}}{F + 2D}$ — factor de corecţie $\lambda = \frac{P_{Al}}{P_{scn}}$ $\alpha = \frac{G_1 Al\, D_1 + G_2 Al\, D_2}{\left(G_1 Al + G_2 Al\right) \frac{F+2D}{2}}$ — factor de corecţie K_{Al} — factorul de umplere al înfăşurării K_z — factorul de corecţie privind creşterea lui K din cauza asimetriei înfăşurărilor şi legăturilor	

3	$F = 2\,\delta_{02} + \delta_{11} - \delta_{12} + \sqrt{9\delta_{12}^2 + K_1}$	δ_{02} — distanţa de izolare între coloană şi bobină de joasă tensiune; δ_{11} — distanţa de izolare între înfăşurările de înaltă tensinue; δ_{12} — distanţa de izolare între bobinele de joasă şi înaltă tensiune;		0,23 1,5 0,5	dm dm dm
4	$\Pi = \frac{4\,S_n^2 \tau P_{Al}\,\gamma_{Al}\,\alpha 10^{-3}}{\pi \cdot m(0{,}111 \cdot f \cdot K_D)^2 \lambda\, K_{Al}\, P_{scn} B_a^2 (F-A) F^4}$	F — lărgimea ferestrei; $\gamma_{Cu(Al)}$ — greutatea specifică a cuprului (aluminiului); m — numărul de coloane; k — factorul de umplere pentru miez; B_a — inducţia în coloană;	 1,525—1,750	 8,9 3 0,82 1,65	 kg/dm³ T
5	$m_p = T \cdot m_c + m_c\left(\frac{1}{i} + p_c\right)$	m_p — costul specific al puterii active; T — durata sarcinii anuale în ore m_c — costurile specifice de investiţie pt. utilajele suplimentare i — durata timpului de recuperare; p_c — amortizarea anuală şi costuri de exploatare pt. centrală şi reţea;	 4—12 	 8 700 3 000 10 0,053	lei/kW-an ore lei/kW ani —
6	$m_Q = m_k\left(\frac{1}{i} + p_k\right) + T\,\xi\, m_c + \xi\left(\frac{1}{i} + p_c\right)$	m_Q — costul specific al puterii reactive m_k — costul specific al condensatorilor; p_k — amortiz. anuală a condensatorilor; ξ — pierderi specifice în condensatori		 270 0,06 0,003	lei/kVAR-an „ — kW/kVAR
7	$m = \frac{1}{i} + p_T$	τ_m — timpul de utilizare a sarcinii cu pierderi nominale de scurtcircuit $\tau_m = \frac{\int_0^T S^2 dt}{S^2\, m}$; γ — factor de simultaneitate;		5 600	ore/an

Anexa 1 (continuare)

Nr. crt.	Formulele de calcul	Notaţii utilizare	Valori admise		Unităţi
			Limitele admise	Valoarea prezumată	
8	$m'_p = Tm_c + m_c \frac{T}{\tau_m} \gamma^2 \left(\frac{1}{i} + p_c\right)$	p_{10} — pierderi specifice în tolă la $B_a = 1\,T$; K_c — coeficient pt. pierderi suplimentare ;		0,6 1,2	W/kg
9	$U = \frac{m_p \cdot p_{10} \cdot K_c \cdot B_a^2 + m_Q p_a}{m_T\, m_{Fe} \cdot 10^3}$	m_{Fe} — costul unui kg de miez confecţionat ;	10—25	15,5	lei/kg
10	$U' = \frac{m_Q (p_a - \nu^2 p_b)}{\nu^2 m_T m_{Fe}\, 10^3}$	ν — coeficient de majorare a secţiunii jugului ;		1,1	
11	$L = \frac{\nu}{2\pi} \frac{1 + \frac{u}{\nu^2} - u'}{1 + u}$	p_b — pierderi specifice în juguri la inducţie $\frac{B_a}{\nu}$		5	VA/dm²
12	$e = \frac{2h}{F}$	h — distanţa de izolaţie dintre înfăşurări şi jug ;		1,45	dm
13	$A = 2\,\delta_0 + 2\,\delta_{12} + \delta_{11}$				
14	$\mu = \frac{m_{Al} \cdot \gamma_{Al} \cdot k_{Al} \cdot \alpha \cdot (F - A)}{m_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} \cdot k_D \cdot F} \cdot m.$	n_δ — numărul de îmbinări ale tolelor în circuitul magnetic ;		7	
15	$N = \frac{2\,\mu}{1 + u.}$	p_δ — pierderile specifice din întrefier în zonele de îmbinare a tolelor ;	(vezi tabel)	320	VA/dm²
16	$R = \frac{m_Q \cdot n_\delta \cdot p_\delta \cdot 10^{-3}}{m_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} \cdot m_T \cdot F\,(1 + u)}.$				
17	$V = \frac{be + R}{\pi}$	D — diametrul coloanei ;			dm
18	$D = y \cdot F$	$Y = D/F$;			

19	$x = e + \pi \dfrac{1 + 2y}{y\ 4}$	$x = H/F$;			
20	$H = x\ F.$	H — înălțimea coloanei ;			dm
21	$P_0 = p_{10} K_c \dfrac{\pi}{4} \cdot \gamma_{Fe} \cdot K_D \cdot B_a^2 \cdot \dfrac{1}{\nu} F^3$ $(\nu\, bx + c + dy)\ 10^{-3}$	b — coeficienți care depind c — de numărul m al coloa- d — nelor	$b = 2$ $m = 2\ c = 2$ $d = 3{,}5$ $b = 3$ $m = 3\ c = 4$ $d = 5{,}6$		
22	$M = \dfrac{\pi}{4} m_{Fe} \gamma_{Fe} K \nu F^3$ $[\mu\,(x\text{-}e)\ (1 + 2y) + (bx + \nu c + \nu dy) y^2]$	M — costul părții active al transformatorului			lei
23	$Q_0 = \left\{ \dfrac{\pi}{4} K_D \gamma_{Fe} F^3 [p_a\, bx + \nu\, pb\,(c + + dy)] y^2 + \dfrac{\pi}{4} K_D F^2 n\delta\ p\delta\ y^2 \right\} 10^{-3}$	Q — puterea de magnetizare a fierului	(vezi tabel)	15	KVA
24	$K = M\, m_T + P_0\, m_p + Q_0\, m_Q + + \varepsilon\, P_{scn} \left(m'_p + \dfrac{U_r}{U_a} m_Q \right) =$ $= M\, m_T + P_0 m_p + Q_0\, m_p + + P_{sen}\, \varepsilon\, m'_\mu + P_{sen}\, \varepsilon\, m_Q \dfrac{U_r}{U_a} =$ $= M\, m_T + P_0\, m_p + Q_0\, m_Q + + P_{scn} \cdot \varepsilon \cdot m'_p + \varepsilon\, m_Q \dfrac{U_{sc}}{100} 10^4 =$ $= K_M + K_{p0} + K_{Q0} + K_{p\varepsilon} + K_{Q\varepsilon}$	p_a — puterea specifică de magnetizare la inducția B_a K — costul specific total ε — coeficient ce depinde de caracteristica diagramelor de sarcină anuale		0,3	VA/kg lei/an
25	$16{,}8\ L\ y^7 + (8\ L + v)^6 - 3y^3 - - (3 + 2\ H)\ y^2 - 3\ Hy - H = 0.$	— ecuația a cărei rezolvare determină valorile lui y			
26	$\varepsilon = \left(\dfrac{Sm}{Sn} \right)^2 \dfrac{\tau_m}{T} = \left(\dfrac{Sm}{Sn} \right)^2 \left(\dfrac{Tm}{T} \right)^2$				

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ОПТИМАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

РЕЗЮМЕ

Современное представление о проектировке трансформаторов требует получения оптимального технико-экономического решения, учитывающего стоимость производства, эксплуатационные расходы и необходимые добавочные фонды для покрытия потерь активной и реактивной мощностей.

Применение технико-экономических методов требует изучения ряда технических и экономических показателей, значение которых зависит от экономического положения каждой страны в отдельности, которые изменяются во времени в каждой стране в зависимости от прогресса, достигнутого ею на пути экономического развития.

Поэтому представляет особый интерес закон зависимости оптимального решения по установлению размеров трансформатора от этих технических и экономических показателей.

Для конкретного изучения влияния этих показателей на оптимальное решение был избран трехфазный трансформатор мощностью в 10 Мва, с алюминиевыми обмотками, с регулировкой над нагрузкой и напряжением 110 кв.

В работе анализируются, для различных значений номинальных потерь короткого замыкания, влияние удельной стоимости изготовления листов трансформаторной стали для магнитопровода, алюминиевой обмоточной проволоки, электроэнергии, рассеянной при потерях в трансформаторе, нормированного времени рекуперации, времени использования соответственно номинальным потерям короткого замыкания индукции в стержнях магнитопровода на оптимальное решение трансформатора.

Работа заканчивается выводами и рекомендациями относительно степени влияния этих технических и экономических показателей с перечислением тех из них, значение которых должно быть определено в будущем более точно.

BIBLIOGRAFIE

1. I. POPOV, *Eine neue Methode zur Bestimmung der optimalen Abmessungen der Kerne von Leistungstransformatoren.* Deutsche Elektrotechnik, **12**, 7, 243—248 (1958).
2. C. V. BĂLĂ, A. GH. CUPȘA, *Determinarea optimului tehnico-economic absolut în proiectarea transformatoarelor de putere.* St. cerc. de energ., **XIII**-A (1963) (acest volum).
3. M. BÎRGĂUANU, D. CREȚU, *Transformatoare cu cupru sau cu aluminiu ?.* St. cerc. energ., **XIII**-A, 3 (1963) (sub tipar).

DETERMINAREA OPTIMULUI TEHNICO-ECONOMIC ABSOLUT ÎN PROIECTAREA TRANSFORMATOARELOR DE PUTERE*)

DE

C. V. BĂLĂ și A. GH. CUPȘA

621.314.2.012.003

1. INTRODUCERE

Soluției optime din punct de vedere tehnico-economic pentru transformatoarele de putere care funcționează în sarcină un număr de ore ridicat, îi corespunde în general solicitări electrice și magnetice sub cele limit-admisibile determinate de încălzirea transformatorului. Apare astfel libertatea de a dimensiona transformatorul numai pentru puterea nominală, tensiunile nominale și tensiunea de scurtcircuit date. Soluția nu este însă unic determinată ; în urma apariției acestor grade de libertate se poate pune problema ca varianta aleasă pentru transformator să prezinte un preț de cost minim.

Problema calculului dimensiunilor optime ale transformatoarelor de putere la solicitări sau pierderi date a fost tratată în numeroase lucrări, dintre care sînt de menționat îndeosebi lucrările [1] și [2].

În lucrarea [1] Bulgacov stabilește geometria transformatorului pentru care costul de producție al transformatorului avînd o putere și solicitări (sau pierderi) date este minim ; în lucrarea [2] Kreuzer determină geometria și dimensiunile transformatorului în condițiile în care puterea transformatorului, tensiunea de scurtcircuit și pierderile sînt date.

În ultimii ani, au apărut cîteva lucrări [3], [4] — [9], în care se tratează problema alegerii indicilor tehnico-economici care intervin în

*) Lucrarea a fost prezentată în ședința de secție din 9 noiembrie 1962.

proiectarea transformatoarelor și problema determinării dimensiunilor optime ale transformatoarelor de putere pentru care prețul de cost anual este minim. La calculul prețului de cost anual, se pornește de la costul de producție al transformatorului, costul pierderilor și costul bateriei de condensatoare, necesară pentru compensarea puterii reactive de magnetizare a miezului feromagnetic.

Pe baza indicațiilor cuprinse în lucrările [3] și [4], în lucrările [5] și [6] este expusă o metodică de proiectarea transformatoarelor de putere, în ipoteza că inducția magnetică în miezul transformatoarelor are valoarea maximă constantă; minimul prețului de cost este stabilit în funcție de pierderile de scurtcircuit considerate ca variabilă independentă.

Pentru evaluarea influenței diferiților parametri asupra prețului de cost anual al transformatorului, în cadrul metodei prezentată în lucrările [5] și [6] de Popov, este necesar un mare volum de calcule (v. [9]) pentru fiecare tip de transformator în parte. Problema s-a complicat în cadrul acestei metode, pe de o parte, datorită introducerii relației tensiunii de scurtcircuit la calculul optimului, iar pe de altă parte, datorită prevederii detaliate a dimensiunilor izolației înfășurărilor.

De remarcat că la transformatoarele de putere construite pentru tensiuni cu nivel de izolație comparabil, valoarea standardizată a tensiunii de scurtcircuit se poate realiza fie prin dispunerea biconcentrică a înfășurărilor — cînd rezultă prea mare — fie prin lărgirea canalului de scăpări — cînd rezultă prea mică —; prin urmare, tensiunea de scurtcircuit nu poate reprezenta o condiție absolut restrictivă pentru dimensionarea transformatoarelor de putere.

În lucrarea de față se prezintă o metodă de calcul pentru stabilirea optimului tehnico-economic absolut, prin care se determină dimensiunile optime și solicitările transformatorului de putere dată în funcție de factorul de umplere al ferestrei și de condițiile de exploatare exprimate prin duratele de funcționare cu pierderile nominale în miez, respectiv în înfășurări. Metoda ține seama de curba pierderilor și a puterii de magnetizare, ridicate la transformatoarele construite.

Expresiile obținute pentru dimensiunile caracteristice ale transformatorului și pentru solicitările electrice și magnetice permit examinarea directă a influenței parametrilor constructivi (prețuri de cost, factori de umplere, pierderi specifice) și funcționali (durata de funcționare) asupra construcției transformatorului.

Totodată, metoda permite o comparație directă simplă între transformatoarele cu cupru și cele cu aluminiu.

Din exemplele de calcul efectuate, rezultă că transformatoarele proiectate după această metodică au și în cazurile uzuale tensiunea de scurtcircuit corespunzătoare normelor actuale.

2. NOTAȚII

C — costul anual al transformatorului;
S_n — puterea nominală a transformatorului;
f — frecvența tensiunii de alimentare;

P_{scn} — pierderile în înfășurare la curentul nominal;
P_{on} — pierderile la funcționarea în gol a transformatorului la tensiunea nominală;
T_m — durata anuală — în ore — corespunzătoare funcționării transformatorului cu pierderile nominale în miez

$$T_m = \frac{\int_0^{T_f} P_0 \, dt}{P_{0n}};$$

T_c — durata anuală — în ore — corespunzătoare funcționării transformatorului cu pierderile nominale în înfășurări

$$T_c = \frac{\int_0^{T_f} P_{sc} \, dt}{P_{scn}};$$

T_f — durata anuală — în ore — în care transformatorul este cuplat la rețea (în stare de funcționare);
T — timpul de recuperare;
k_e — coeficient de eficiență economică;
B — inducția magnetică în coloană;
J — densitatea curentului în înfășurări;
γ_m — greutatea specifică a miezului;
γ_c — greutatea specifică a conductorului;
m — numărul de faze;
D — diametrul coloanei (vezi fig. 1);
H — înălțimea ferestrei (vezi fig. 1);
F — lățimea ferestrei (vezi fig. 1);
S_m — secțiunea netă a coloanei;
S_c — secțiunea netă a înfășurării pe fază;
σ_m — factorul de umplere al miezului

$$\left(\sigma_m = \frac{4\,S_m}{\pi\,D^2}\right);$$

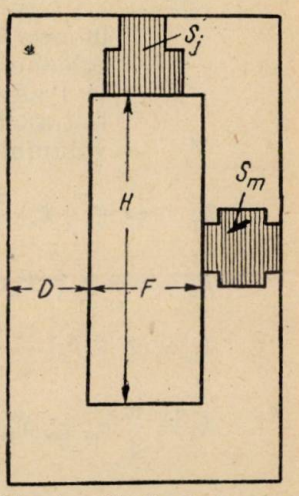


Fig. 1. — Explicativă pentru dimensiunile caracteristice ale miezului.

σ_c — factorul de umplere al ferestrei

$$\left(\sigma_c = \frac{4\,S_c}{H\,F}\right);$$

$x = \frac{H}{D}$, $y = \frac{F}{2D}$ — factori de geometrie ai miezului;
ρ — rezistivitatea materialului conductor;
c_c — costul specific (lei/kg) al înfășurării transformatorului, raportat la 1 kg de conductor neizolat;
c_m — costul specific (lei/kg) al miezului, raportat la 1 kg de tolă neizolată;

c_e — costul specific al energiei electrice (lei/kWh) la bornele primare ale transformatorului;

c_Q — costul unității de baterie de condensatoare (lei/kVAR);

p — pierderile specifice (W/kg) în miezul feromagnetic la inducția B;

q — puterea de magnetizare (VA/kg) în miezul feromagnetic la inducția B (inclusiv puterea de magnetizare a întrefierului);

α, β — coeficienți;

Q_0 — puterea de magnetizare a transformatorului la funcționare în gol;

Q_{sc} — puterea de magnetizare a transformatorului la funcționarea în scurtcircuit;

ν — raportul dintre aria secțiunii jugului S_j și aria secțiunii coloanei S_m;

V_m — volumul miezului feromagnetic $[V_m = \frac{\pi}{4}\ \sigma_m(hx + \nu by + \nu d)\, D^3]$ în care h,b și d au următoarele valori în funcție de numărul coloanelor [1]:
la transformatorul monofazat $h = 2$, $b = 4$, $d = 3{,}6$,
la transformatorul trifazat $h = 3$, $b = 8$, $d = 5{,}6$;

V_c — volumul conductorului înfășurării $[V_c = \pi m\, \sigma_c\, xy\,(y + 1) D^3]$;

$$k_1 = (1 + k_e)\frac{\pi m\ \sigma_c\ \gamma_c\ c_c}{T};$$

$$k_2 = \pi m\ \sigma_c\ \rho\ T_c\ c_e;$$

$$k_3 = (1 + k_e)\frac{\pi}{4}\frac{\sigma_m\ \gamma_m\ c_m}{T};$$

$$k_4 = \frac{\pi}{4}\ \sigma_m\ \gamma_m\ T_m\ c_e\ \alpha.$$

3. STABILIREA ECUAȚIILOR ȘI REZOLVAREA LOR PENTRU DETERMINAREA OPTIMULUI TEHNICO-ECONOMIC

a. *Costul anual al pierderilor în miez și al compensării puterii de magnetizare la funcționarea în gol.* Înainte de a stabili expresia costului anual al transformatorului, să exprimăm costul anual al pierderilor în miez și al bateriei de condensatoare necesară compensării puterii de magnetizare în coloanele și jugurile transformatorului în funcție de inducția magnetică din coloană.

Costul anual al pierderilor și al puterii de magnetizare din coloană este

$$C_{pm} = \frac{\pi}{4}\ \sigma_m\ \gamma_m\ T_m\ c_e \left[p + q\,\frac{c_Q\,(1 + k_e)}{T T_m\ c_e} \right] hx D^3, \qquad (1)$$

iar costul anual al pierderilor și puterii de magnetizare din jug este

$$C_{pj} = \frac{\pi}{4} \sigma_m \gamma_m T_m c_e \left[p_j + q_j \frac{c_Q (1 + k_e)}{T T_m c_e} \right] \nu (by + d) D^3 . \quad (2)$$

Curbele pierderilor specifice p (B) și a puterii de magnetizare specifică q (B) funcție de inducție se determină experimental pentru fiecare sort de tablă silicioasă utilizată în construcția transformatorului; pe baza acestor curbe se determină apoi pe cale grafică curba

$$p + q \frac{c_Q (1 + k_e)}{T T_m c_e} = f(B), \quad (3)$$

așa cum s-a procedat în figura 2. Această curbă rezultantă se poate exprima pe un domeniu ales potrivit printr-o funcție analitică parabolică astfel

$$f(B) = \alpha B^{\beta}. \quad (4)$$

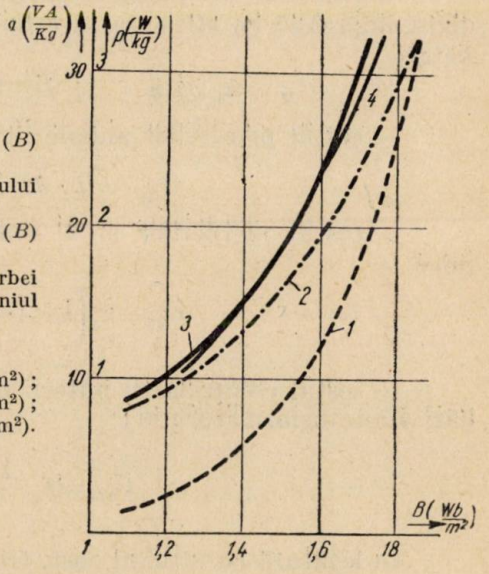


Fig. 2. — 1 Curba pierderilor în miez p (B) (— — —);
2. Curba puterii de magnetizare a miezului $q(B)$ (— · — · — ·);
3. Curba pierderilor echivalente $p + 0{,}036\, q = f(B)$ (———);
Curba analitică $p_m = f(B)$ de aproximare a curbei pierderilor echivalente (———) în domeniul

$$1{,}4 \leqslant B \leqslant 1{,}6 \text{ Wb/m}^2$$

($\alpha = 0{,}498$, $\beta = 3{,}3$ pentru $1{,}4 \leqslant B\ 1{,}6 \leqslant$ Wb/m²);
($\alpha = 0{,}363$, $\beta = 4$ pentru $1{,}6 \leqslant B \leqslant 1{,}8$ Wb/m²);
($\alpha = 0{,}42$, $\beta = 3{,}73$ pentru $1{,}5 \leqslant B \leqslant 1{,}7$ Wb/m²).

În acest caz, costul anual al pierderilor și al compensării puterii de magnetizare se poate scrie în forma simplificată

$$C_{pm} = k_4\ h\ x\ D^3\ B^{\beta} . \quad (5)$$

Printr-o relație identică cu (4) se poate exprima și suma din prima paranteză a membrului al doilea din relația (2)

$$p_j + q_j \frac{c_Q (1 + k_e)}{T T_m c_e} = \alpha B_j^{\beta}. \quad (6)$$

Din legea fluxului magnetic rezultă

$$B_j = \frac{S_m}{S_j} B, \tag{7}$$

sau

$$B_j = \frac{B}{\nu}.$$

Prin urmare, costul anual al pierderilor în miez şi al bateriei de condensatoare necesară compensării puterii de magnetizare se poate scrie astfel:

$$C_{pB} = C_{pm} + C_{pj} = k_4 \left(hx + \frac{by + d}{\nu^{\beta-1}} \right) B^\beta D^3. \tag{8}$$

b. *Costul anual al transformatorului.* În componenţa costului anual al transformatorului se introduce:

— costul de producţie al părţilor active ale transformatorului considerat împreună cu eficienţa sa economică şi raportat la timpul de recuperare

$$C_M = k_1 xy(y + 1) D^3 + k_3(hx + \nu by + \nu d) D^3;$$

— costul pierderilor anuale în înfăşurări

$$C_{pJ} = k_2 J^2 xy (y + 1) D^3;$$

— costul pierderilor şi al compensării puterii de magnetizare în miez

$$C_{pB} = k_4 \left(hx + \frac{by + d}{\nu^{\beta-1}} \right) B^\beta D^3;$$

— costul compensării puterii de magnetizare din cîmpurile de scăpări ale transformatorului;

$$C_{qB} = Q_{sc} \frac{1 + k_e}{T} c_Q.$$

În legătură cu ultimul cost, trebuie observat că la transformatoarele de putere şi tensiune de scurtcircuit dată, acest cost este constant, indiferent de geometria şi dimensiunile transformatorului.

Prin urmare, costul anual al transformatorului este:

$$C = \left[(k_1 + k_2 J^2) xy(y + 1) + k_3(hx + \nu by + \nu d) + \right.$$

$$\left. + k_4 \left(hx + \frac{by + d}{\nu^{\beta-1}} \right) B^\beta \right] D^3 + Q_{sc} \frac{1 + k_e}{T} c_Q. \tag{9}$$

În relația de mai sus, intervin 6 necunoscute : x,y,D,J,B și ν ; primele cinci necunoscute mai sînt legate între ele prin relația care dă puterea transformatorului. Relația de mai sus se poate scrie și în forma

$$C = \mathfrak{F}\, D^3 + Q_{sc}\frac{1+k_e}{T}\, c_Q, \tag{9'}$$

în care

$$\mathfrak{F} = (k_1 + k_2 J^2)\, xy\,(y+1) + k_3(hx + \nu by + \nu d) + k_4\left(hx + \frac{by+d}{\nu^{\beta-1}}\right)B^\beta. \tag{10}$$

Relația dintre puterea transformatorului, dimensiuni și solicitări este

$$S_n = 2{,}22 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot mf\ \sigma_c\ \sigma_m\ J\ Bxy\ D^4. \tag{11}$$

c. *Ecuațiile care determină optimul tehnico-economic al transformatorului.* Extremele funcției costului C (x,y,D,J,B,ν) cu variabilele legate prin relația puterii, se determină din ecuațiile

$$\frac{\partial C}{\partial \xi} - \frac{\partial C}{\partial D}\frac{\dfrac{\partial S_n}{\partial \xi}}{\dfrac{\partial S_n}{\partial D}} = 0, \text{ unde } \xi = x,y,J,B,\nu. \tag{12}$$

Ținînd seama de relațiile (9'), (10) și (11) rezultă

$$\xi\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \xi} - \frac{3}{4}\mathfrak{F} = 0, \text{ unde } \xi = x,y,J,B\,; \tag{13}$$

$$\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \nu} = 0. \tag{14}$$

Înlocuind pe $\mathfrak{F}$ și efectuînd calculele se obțin ecuațiile

$$(k_1+k_2 J^2)\, xy\,(y+1) + k_3(hx - 3\,\nu by - 3\nu d) + k_4\left(hx - 3\,\frac{by+d}{\nu^{\beta-1}}\right)B^\beta = 0, \tag{15}$$

$$(k_1 + k_2 J^2)\, xy\,(5y+1) + k_3(\nu by - 3\,hx - 3\nu d) + k_4\left(\frac{by-3d}{\nu^{\beta-1}} - 3hx\right)B^\beta = 0, \tag{16}$$

$$(k_1 - 1{,}67\, k_2 J^2)\, xy\,(y+1) + k_3(hx + b\nu y + \nu d) + k_4\left(hx + \frac{by+d}{\nu^{\beta-1}}\right) B^\beta = 0, \tag{17}$$

$$(k_1+k_2J^2)\, xy\,(y+1) + k_3(hx+b\nu y+\nu d) + k_4(1-1{,}33\,\beta)\left(hx + \frac{by+d}{\nu^{\beta-1}}\right) B^\beta = 0, \tag{18}$$

$$\nu^\beta = \frac{k_4}{k_3}(\beta-1)\, B^\beta. \tag{19}$$

Sistemul de ecuații obținut nu conține diametrul D al transformatorului; deci soluția tehnico-economică nu depinde direct de puterea și tensiunile nominale ale transformatorului în privința geometriei (caracterizată de variabilele x și y) și solicitărilor electrice și magnetice, ci indirect prin intermediul factorilor de umplere al miezului și al ferestrei.

Cîteva concluzii generale rezultă direct din sistemul de ecuații (15) — (18). Astfel, din ecuația (13) scrisă corespunzător pentru $\xi = J, B$ rezultă

$$2 k_2 J^2 xy (y + 1) - \frac{3}{4} \mathfrak{F} = 0, \tag{20}$$

$$\beta k_4 B^\beta \left(hx + \frac{b}{\nu^{\beta-1}} y + \frac{d}{\nu^{\beta-1}} \right) - \frac{3}{4} \mathfrak{F} = 0; \tag{21}$$

din aceste ecuații se obține raportul optim al costului pierderilor în înfășurări și în miez

$$\frac{C_{pJ}}{C_{pB}} = \frac{\beta}{2}; \tag{22}$$

în cazul particular cînd $\beta = 2$, rezultă că optimum tehnico-economic se obține cînd costul pierderilor în înfășurare este egal cu costul pierderilor în miez. În realitate $\beta > 2$ și prin urmare costul anual al pierderilor în înfășurare este mai mare decît costul pierderilor în miez la transformatorul optim.

Din relațiile (10), (20) și (22) rezultă raportul optim dintre costul materialelor și costul pierderilor :

$$\frac{C_M}{C_{pJ} + C_{pB}} = \frac{5\beta - 6}{3\beta + 6}; \tag{23}$$

n cazul particular cînd $\beta = 2$, optimul se obține cînd costul anual de producție al transformatorului este 1/3 din costul anual al pierderilor în transformator.

d. *Rezolvarea sistemului pentru cazul particular* $\nu = 1$. În cazul simplificat cînd secțiunea jugului S_j este egală cu secțiunea coloanei transformatorului, sistemul de ecuații (15)—(18) devine

$$(k_1 + k_2 J^2) xy (y + 1) + (k_3 + k_4 B^\beta) (hx - 3by - 3d) = 0, \tag{24}$$

$$(k_1 + k_2 J^2) xy (5y + 1) + (k_3 + k_4 B^\beta) (by - 3hx - 3d) = 0, \tag{25}$$

$$(k_1 - 1{,}67 k_2 J^2) xy (y + 1) + (k_3 + k_4 B^\beta) (hx + by + d) = 0, \tag{26}$$

$$(k_1 + k_2 J^2) xy (y + 1) + [k_3 + (1 - 1{,}33 \beta) k_4 B^\beta] (hx + by + d) = 0. \tag{27}$$

Din ecuațiile (24) și (25) rezultă

$$x = \frac{y (4by + b + 3d)}{h (2y + 1)}; \tag{28}$$

din ecuațiile (24), (27) și (28) se obține

$$B = \sqrt[\beta]{3\frac{k_3}{k_4}\frac{(2y+1)(by+d)}{6by^2(\beta-1)+b(2\beta-3)y+d(5\beta-6)y+(\beta-3)d}}; \quad (29)$$

înlocuind pe x și B de mai sus în ecuația (26) de exemplu, rezultă:

$$J = \sqrt{3\frac{k_1}{k_2}\frac{(2y+1)(by+d)}{-2by^2+by+3d}}; \quad (30)$$

în sfîrșit, introducînd pe x, B și J în ecuația (25) se obține următoarea ecuație în y

$$y^2(y+1)(4by+b+3d)[6b(\beta-1)y^2+b(2\beta-3)y+d(5\beta-6)y+$$

$$+(\beta-3)d]+\frac{\beta}{2}\frac{k_3}{k_1}h(2by^2-by-3d)(6by^2+2by+5dy+d)=0. \quad (31)$$

Analizînd ecuațiile (28) — (31) rezultă:

1. Geometria optimă a transformatorului caracterizată de mărimile x și y, depinde de raportul k_3/k_1 (care este proporțional cu raportul costurilor specifice ale miezului și înfășurărilor $\frac{c_m}{c_c}$ și raportul factorilor de umplere $\frac{\sigma_m}{\sigma_c}$), de factorul β și de numărul de coloane al transformatorului (h, b și d au valori diferite la transformatorul monofazat cu 2 coloane, — respectiv trifazat cu 5 coloane — față de transformatorul trifazat cu 3 coloane); geometria transformatorului nu depinde de pierderile specifice și variază numai în foarte mică măsură cu timpul de funcționare și timpul de recuperare, (prin intermediul costului compensării puterii reactive de magnetizare).

2. Valoarea optimă a densității de curent (vezi ecuația (30)) depinde de mărimea T_c — durata de funcționare a transformatorului cu pierderile nominale în înfășurări.

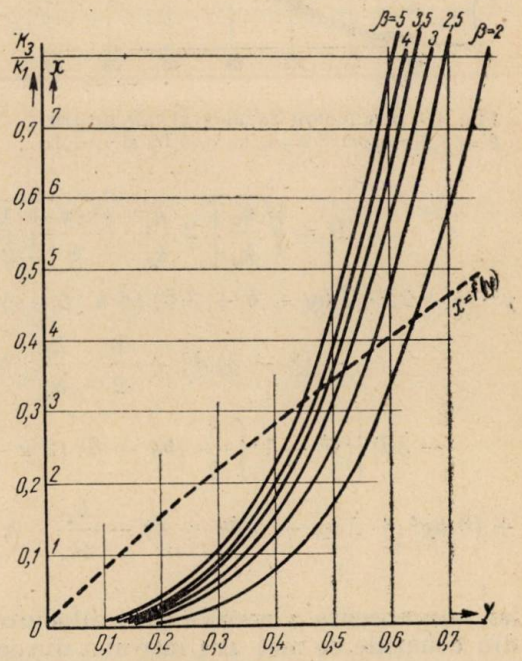


Fig. 3. — y în funcție de raportul k_3/k_1 (fig. 3) pentru $2 \leqslant \beta \leqslant 5$, la $\nu = 1$.

3. Valoarea optimă a inducției magnetice (vezi ecuația (29)) depinde de mărimea T_m — durata de funcționare a transformatorului cu pierderile nominale în miez.

În figura 3 s-a reprezentat mărimea y în funcție de raportul k_3/k_1 pentru diferite valori ale lui β — în domeniul $(2 \leqslant \beta \leqslant 5)$ — calculată pe baza ecuației (31) și x în funcție de y calculat pe baza ecuației (28); din această figură la β și k_3/k_1 dați, se determină pe cale grafică mărimile x și y.

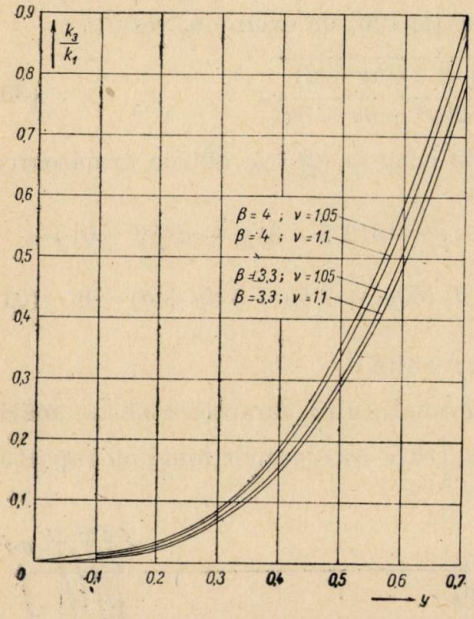


Fig. 4. — y în funcție de raportul k_3/k_1 pentru $\beta = 3{,}3$ respectiv $\beta=4$, la $\nu=1{,}05$ și $\nu=1{,}1$.

e. *Rezolvarea sistemului pentru* ν *oarecare.* La transformatoarele de putere cu coloanele dispuse în linie, se adoptă majorarea secțiunii jugului în raport cu secțiunea coloanei în vederea reducerii asimetriei magnetice.

Factorul de majorare ν se alege uzual între limitele $1 \leqslant \nu \leqslant 1{,}1$. Soluția sistemului (15) — (18) considerînd pe ν ca parametru este

$$J = \sqrt{3 \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{(2y+1)(by+d)}{-2\,by^2 + by + 3d}}, \tag{32}$$

$$B = \sqrt[\beta]{\frac{k_3}{k_4}\left[2\,\frac{k_1}{k_3} \cdot \frac{y^2(y+1)(4\,by+b+3d)}{h\,(-2\,by^2+by+3d)} - 1\right]} \tag{33}$$

$$y^3 \cdot (y+1)^2 \cdot (4\,by + b + 3\,d)\,[6\,b\,[\beta-1)\,y^2 + b\,(2\,\beta-3)y + d\,(5\,\beta-6)y +$$

$$+ (\beta - 3)\,d] + \frac{\beta}{2} \cdot \frac{k_3}{k_1} \cdot hy\,(y+1)\,(2by^2 - by -$$

$$- 3d)\left\{(\nu^\beta - 1)\left[\frac{3}{\beta}\,(by + d)\,(2\,y + 1) - y\,(4\,by + b + 3d)\right] +\right.$$

$$\left. + (6\,by^2 + 2\,by + 5\,dy + d) - \frac{k_3}{2k_1} \cdot h\,(\nu^\beta - 1)\,(2\,by^2 - by - 3d)\right\} = 0, \tag{34}$$

iar necunoscuta x rezultă prin înlocuirea valorilor y, J și B determinate din ecuațiile de mai sus într-una din ecuațiile (15) — (18). Soluția ecuației (34) poate fi de asemenea obținută grafic — în funcție de ν și β — și este dată în figura 4.

Soluțiile de mai sus particularizate pentru cazul $\nu = 1$ conduc la soluțiile (28) — (31) stabilite în paragraful precedent.

f. *Rezolvarea sistemului pentru ν optim.* Din sistemul de ecuații (15) — (19) se poate determina soluția optimă considerînd ca variabile independente pe x, y, J, B și ν. Soluția sistemului în acest caz este

$$J = \sqrt{3\,\frac{k_1}{k_2}\cdot\frac{(2y+1)(by+d)}{-2by^2+by+3d}}, \tag{35}$$

$$B = \sqrt{4\cdot\frac{k_3}{k_4}\cdot\frac{h+\frac{k_1}{k_3}y(y+1)}{h(3\beta-4)}}, \tag{36}$$

$$y(y+1)[4by^2(\beta-1)+by(\beta-2)+ \\ +dy(3\beta-4)-2d]+ \\ +\beta h\frac{k_3}{2k_1}(2by^2-by-3d)=0, \tag{37}$$

iar necunoscuta x rezultă prin înlocuirea valorilor y, J, B și ν determinate din relațiile (35), (36), (37) și (19), într-una din ecuațiile (15) — (18).

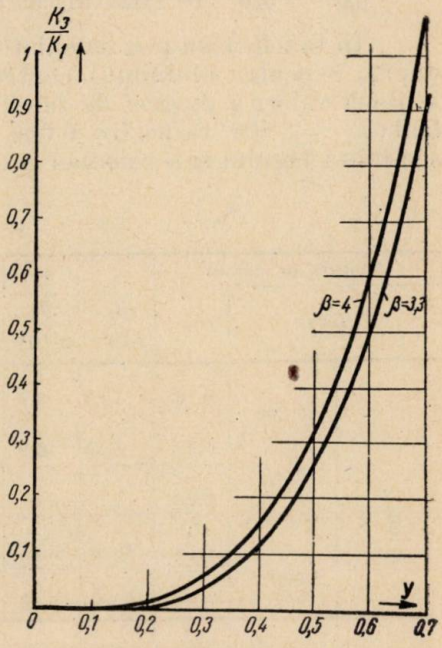


Fig. 5. — y în funcție de raportul k_3/k_1 pentru $\beta = 3{,}3$, respectiv $\beta = 4$, ν avînd valoarea optimă.

În figura 5 s-a reprezentat grafic soluția ecuației (37) pentru y în funcție de raportul k_3/k_1 pentru transformatorul cu 3 coloane, avînd coloanele dispuse în linie, β fiind considerat ca parametru; pentru β s-au luat valorile $\beta = 3{,}3$ — respectiv $\beta = 4$, determinate din figura 2 pentru a acoperi domeniul $1{,}4 \leqslant B \leqslant 1{,}8$ Wb/m².

4. EXEMPLE NUMERICE

Pentru a examina influența diferiților parametri asupra soluției optime și a face comparații cantitative directe s-au aplicat relațiile deduse la un transformator trifazat cu 3 coloane avînd $S_n = 10$ MVA și $f = 50$ Hz.

Miezul se consideră executat din tolă laminată la rece. S-au calculat mai multe variante pentru înfășurări din cupru respectiv din aluminiu, pentru diferite condiții de funcționare.

Premisele comune de calcul sînt:

$T = 10$ ani,
$T_m = 8\,000$ ore,
$k_e = 0{,}6$,
$c_{Cu} = 47$ lei/kg, $c_{Al} = 39$ lei/kg,

c_m = 15 lei/kg, c_e = 0,15 lei/kWh,
c_Q = 270 lei/kVAR,
σ_m = 0,825,
ρ_{Cu} = 2,16 $10^{-8}\Omega$. m (la 75°C),
ρ_{Al} = 3,6 $10^{-8}\Omega$. m (la 75°C).

În tabela 1 au fost calculate 16 variante de transformator (8 pentru cupru, 8 pentru aluminiu) pentru diferiți factori de umplerea ferestrei la două valori a duratei de funcționare cu pierderi nominale în scurtcircuit (T_c = 3 000 respectiv 6 000 ore), pentru diferite rapoarte ν între secțiunea jugului și a coloanei (1 ; 1,1 ; optim). S-au calculat și tensiunile

Tabela

Ipoteze de calcul			$\frac{k_3}{k_1}$ x 10^{-2}	$\frac{k_1}{k_2}$ x 10^{12}	$\frac{k_3}{k_4}$	y_{opt}	x_{opt}	B (Wb/m²)	J (A/mm²)	D (cm)	H (cm)
T_c (ore)		σ_c									
CUPRU	3 000	0,18	10,8	6,9	4,151	0,342	2,46	1,515	4,05	47,2	116
		0,22	8,85	6,9	4,151	0,32	2,3	1,531	3,95	46,6	107
		0,26	7,5	6,9	4,151	0,305	2,2	1,542	3,88	46,0	101,2
	6 000	0,18	10,8	3,45	4,151	0,342	2,46	1,515	2,87	51,5	126,8
		0,22	8,85	3,45	4,151	0,32	2,3	1,531	2,8	50,7	116,5
		0,26	7,5	3,45	4,151	0,305	2,2	1,542	2,75	50,0	110
ALUMINIU	3 000	0,26	29,8	1,04	4,151	0,48	3,3	1,435	1,82	45,5	150
		0,32	24,2	1,04	4,151	0,45	3,12	1,452	1,78	44,7	139,5
		0,38	20,4	1,04	4,151	0,425	2,96	1,465	1,73	44,1	130,5
	6 000	0,26	29,8	0,52	4,151	0,48	3,3	1,435	1,29	49,6	163,5
		0,32	24,2	0,52	4,151	0,45	3,12	1,452	1,262	48,6	152
		0,38	20,4	0,52	4,151	0,425	2,96	1,465	1,225	48,0	142,5

*) În costul anual s-au introdus doar : C_M ; C_{pJ} ; C_{pB} ; nu s-au introdus C_{qB} și costul

Cupru 3 000 ore	ν = 1,1	0,22	8,85	6,9	4,151	0,322	2,16	1,61	4,1	46,2	100
	ν = 1,42	0,22	8,85	6,9	5,7	0,34	1,92	1,67	4,05	46,6	89,5
Aluminiu 3 000 ore	ν = 1,1	0,32	24,2	1,04	4,151	0,455	2,94	1,52	1,83	44,4	130,5
	ν = 1,33	0,32	24,2	1,04	4,92	0,47	2,64	1,57	1,82	45,0	114

de scurtcircuit corespunzătoare. Schițele miezurilor celor 12 variante pentru $\nu = 1$ sînt date în figura 6 *a*, *b*. Din analiza datelor din tabela 1 rezultă:

— costul de producție, respectiv costul anual, este întotdeauna mai mare la transformatoarele cu cupru față de cele cu aluminiu, pentru aceleași condiții de funcționare;

— creșterea factorului de umplere a ferestrei duce evident la scăderea continuă a costului transformatorului;

— variația timpului de utilizare T_c la pierderi nominale de scurtcircuit modifică sensibil geometria transformatorului; variația lui T_c de

1

F (cm)	G_c (kg)	G_m (kg)	P_{scn} 75° (kW)	P_{on} (kW)	Costul de producție (lei)	Costul anual (*) (lei)	I_{or} (%)	U_{scr} (%)	U_n (kV)	
32,2	1780	8 200	71	13,6	205 500	84 000	0,736	8,7	110	$\beta = 3,3$
29,8	1835	7 600	69,6	13,1	200 000	80 000	0,722	6,5	35	„
28,1	1870	7 110	68,4	12,45	194 500	77 800	0,695	6,7	35	„
35,2	2320	10 700	46,5	17,8	269 000	107 500	0,96	6,03	110	„
32,4	2380	9 860	45,2	17	260 000	104 500	0,937	4,85	35	„
30,5	2420	9 200	44,2	16,12	252 000	101 000	0,9	5,18	35	„
43,7	1470	9 000	65	13,6	192 500	77 300	0,585	10,6	110	„
40,3	1490	8 260	62,7	12,2	182 000	73 000	0,579	8,6	35	„
37,5	1500	7 570	60	11,35	172 000	69 000	0,55	8,85	35	„
47,6	1910	11 700	42,2	16,4	250 500	102 000	0,76	7,7	110	„
43,8	1930	10 700	40,5	15,75	236 200	95 000	0,745	6,53	35	„
41	1950	9 840	39	14,9	224 000	90 000	0,715	6,65	35	„
cuvei cu instalațiile aferente deoarece ele se consideră constante										
29,8	1670	7 600	69,4	12,84	192 500	77 000	0,803	6,5	35	$\beta = 3,3$
31,7	1640	8 800	65	11,95	209 000	76 200	0,57	7,1	35	$\beta = 4$
40,3	1380	8 160	61,6	11,7	176 000	70 500	0,631	8,4	35	$\beta = 3,3$
42,2	1330	8 950	58,5	10,85	186 000	70 000	0,468	9,35	35	$\beta = 3,7$

la 3 000 ore la 6 000 ore conduce la o creştere cu circa 33% a costului transformatorului;

— pe măsură ce cresc duratele de utilizare T_c şi T_m rezultă pentru transformator solicitări din ce în ce mai reduse, deci o răcire mai uşoară;

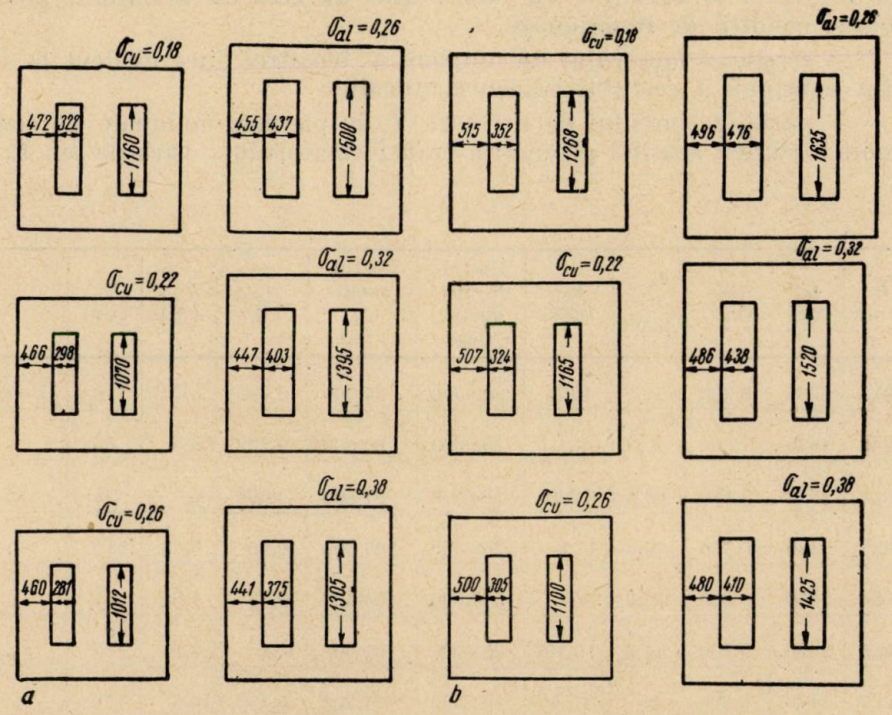


Fig. 6. — Schiţele miezurilor transformatoarelor din tabela 1 calculate pentru $\nu = 1$.
a — la transformatoare cu $T_c = 3\,000$ ore;
b — la transformatoare cu $T_c = 6\,000$ ore.

— tensiunea de scurtcircuit are valori mai mari la transformatoarele cu aluminiu;

— la durata de utilizare T_c constantă, costul anual al transformatorului scade pe măsură ce creşte ν; scăderea sensibilă se produce pînă la $\nu = 1{,}1$; ulterior, pînă la valoarea optimă de cca 1,35—1,4 preţul de cost (minim) scade foarte puţin (sub 1%);

— la durată de utilizare T_c dată, costul de producţie al transformatorului scade cînd ν variază de la 1 la 1, 1. Aceasta se explică prin faptul că reducerea costului înfăşurărilor este mai mare decît creşterea costului miezului. Pentru $\nu > 1{,}1$, costul de producţie creşte mult întrucît scăderea costului înfăşurării este mai mică decît creşterea costului miezului.

Din aceste motive apare indicat ca raportul ν să nu se ia mai mare ca 1,1 (dar în orice caz mai mare ca 1).

Influența lui ν

Pentru a vedea direct influența lui ν (în domeniul $1 \leqslant \nu \leqslant 1{,}1$) asupra mărimilor x, y, J, B, sistemul de ecuații (15) — (18) a fost rezolvat pentru cazul transformatorului de 10 MVA (la $T_c = 3\,000$ ore) — cu înfășurări de cupru respectiv aluminiu — considerat la $U_n = 35$ kV (adică $\sigma_{Cu} = 0{,}22$; $\sigma_{Al} = 0{,}32$).

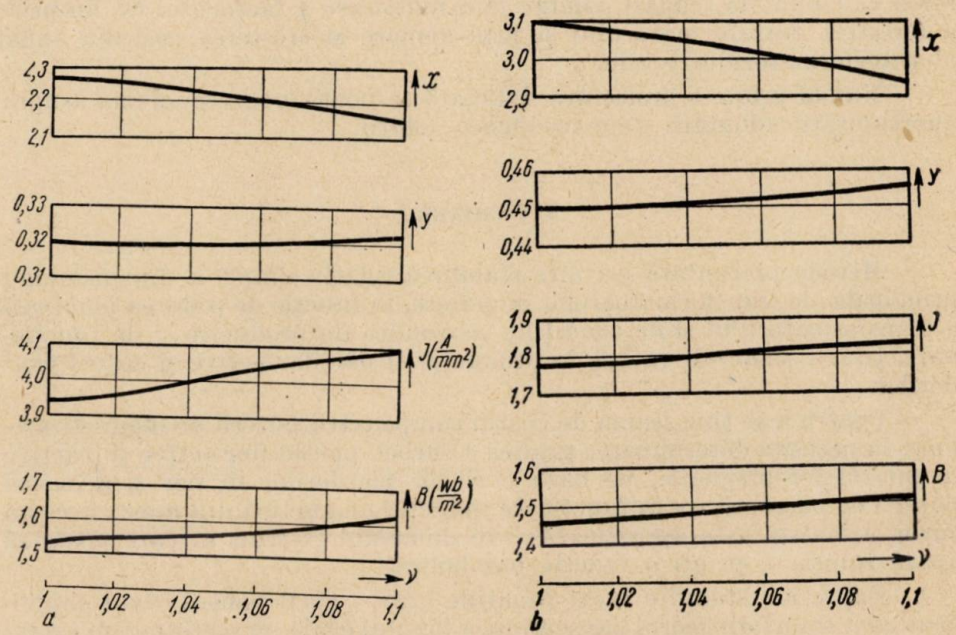


Fig. 7. — x, y, J, $B = f(\nu)$ pentru $1 \leqslant \nu \leqslant 1{,}1$
a — la transformatorul cu înfășurări din cupru;
b — la transformatorul cu înfășurări din aluminiu.

Rezultatele sînt date sub formă de curbe în figura 7 *a* pentru cupru și în figura 7 *b* pentru aluminiu.

Se observă că în domeniul $1 \leqslant \nu \leqslant 1{,}1$, o dată cu creșterea lui ν cresc puțin solicitările și scade raportul $\frac{x}{y}$, adică transformatorul este mai scund.

Influența asupra diametrului coloanei este mică.

Tensiunea de scurtcircuit

Din tabelă rezultă că tensiunile de scurtcircuit pentru care s-au calculat numai componentele reactive corespund — în general — cu cele din norme (pt. 35 kV și 110 kV). În calcul, valorile mici ale factorilor de umplere corespund tensiunii de 110 kV, iar valorile mari unei tensiuni nominale de 35 kV. O serie de valori (în cazul transformatoarelor cu înfă-

șurări din cupru și la $T_c = 6\,000$ ore), se abat însă sensibil față de prescripții.

Prin majorarea canalului de scăpări, tensiunea de scurtcircuit se poate mări; prin adoptarea tipului de înfășurare biconcentric valoarea acesteia se poate micșora.

Evident că atît dispunerea biconcentrică a înfășurărilor cît și majorarea canalului de scăpări conduc la o micșorare a factorului de umplere a ferestrei transformatorului și prin urmare la creșterea costului anual al transformatorului optim.

Numai printr-o proiectare detaliată se poate trage concluzia asupra oportunității adoptării unor asemenea soluții.

5. ÎNCHEIERE

Metoda prezentată permite stabilirea relativ simplă a dimensiunilor principale ale transformatoarelor de putere, în funcție de puterea nominală a transformatorului și de condițiile economice de producție și de funcționare, ținînd seama de costul de producție al părților active și costul pierderilor.

Pentru a se ține seama de costul compensării puterii de magnetizare, metoda necesită determinarea grafică a curbei pierderilor active și reactive în miezul feromagnetic, pe baza curbelor pierderilor în fier și a curbei puterii de magnetizare în funcție de inducția magnetică din miez; această curbă calculată este aproximată -- în domeniul restrîns în care poate să apară soluția — printr-o funcție parabolică.

Expresiile stabilite (vezi ecuațiile (28) — (31)) pentru cazul simplificat cînd transformatorul are secțiunea jugului egală cu secțiunea miezului ($\nu = 1$) permit să se analizeze direct influența principalilor indici tehnico-economici asupra soluției tehnico-economice optime; se constată astfel următoarele:

— geometria transformatorului depinde de raportul costurilor de producție ale părților active și de tensiunea transformatorului (y, respectiv x depinde de factorul de umplere T_c al ferestrei transformatorului);

— solicitările electrice și magnetice ale transformatorului depind de condițiile de funcționare ale transformatorului; duratele de funcționare T_c și T_m, precum și costul unității de energie electrică la bornele primare ale transformatorului influențează direct valorile optime ale acestor solicitări. De remarcat că pentru durata de funcționare ridicată, rezultă solicitări mai reduse și prin urmare, soluția nu implică probleme deosebite în ceea ce privește încălzirea transformatorului.

Din calculele efectuate rezultă că deși valoarea optimă—din punctul de vedere al minimului costului anual — pentru ν rezultă cuprinsă între 1,35—1,42, este recomandabil ca ν să nu fie luat mai mare ca 1,1 deoarece cresc mult dimensiunile transformatorului, prețul de producție și în plus, scăderea în continuare a costului anual devine neînsemnată.

BESTIMMUNG DES ABSOLUTEN TECHNISCH-ÖKONOMISCHEN OPTIMUMS BEIM ENTWURF VON LEISTUNGSTRANSFORMATOREN

ZUSAMMENFASSUNG

Die Arbeit behandelt die Frage der Bestimmung der technisch-ökonomischen Variante, die bei einer gegebenen Nennleistung ein Optimum der Herstellungskosten ergibt.

In die Berechnung der Jahreskosten für Transformatoren werden folgende Werte einbezogen:

— Die Herstellungskosten (mit der ökonomischen Wirksamkeit der Investitionen) der aktiven Werkstoffe in fertiggestelltem Zustand (Kern, Wicklungen), bezogen auf die im energetischem Sektor genormten Betriebsjahre.

— Die Jahreskosten der Verluste im Trafo, durch welche auch den erforderlichen Zusatzinvestitionskosten im energetischen System Rechnung getragen werden kann; zu diesem Zweck werden die spezifischen Kosten der Elektroenergie an den Primärklemmen des Trafos eingeführt.

— Die (auf die normierten Betriebsjahre) bezogenen Kosten der Kondensatorenbatterie, die zum Ausgleich der Magnetisierungsleistung des Kernes und des Laststreufeldes erforderlich ist.

In der Arbeit wird das Minimum der Jahreskosten in Abhängigkeit von 6 Variabeln untersucht: Schenkeldurchmesser D, Stromdichte J, Induktion B in dem Schenkel, Verhältnis ν von Joch - zu Schenkelquerschnitt, Verhältnis x von Fensterhöhe zu Schenkeldurchmesser, Verhältnis y von Fensterbreite zum doppelten Schenkeldurchmesser, wobei die Gleichung der elektromagnetischen Transformatorleistung berücksichtigt wird. Bei der Aufstellung der Mindestjahreskosten wurde der Wert der Kurzschlußspannung nicht in Anrechnung gebracht, weil einerseits diese, wie aus dem durchgeführten Rechenbeispiel hervorgeht, keine absolut einschränkende Bedingung darstellt, und es andererseits wichtig ist, die Mindestkosten zu ermitteln, um den Einfluß der Kurzschlußspannung auf die Herstellungskosten des Transformators festzustellen.

Die Frage der Erwärmung muß ebenfalls nicht direkt berücksichtigt werden, weil besonders bei Transformatoren mit großer Betriebsdauer unter Last, die elektrischen und magnetischen Beanspruchungen unterhalb der thermisch zulässigen bleiben.

Die Kostenberechnung für die Verluste im Kern und für den Ausgleich der Magnetisierungsleistung erfolgt ausgehend von den bei ausgeführten Transformatoren ermittelten spezifischen Verlusten in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion B. Diese experimentell bestimmten Kurven werden abschnittsweise durch analytische Funktionen angenähert.

Die eingeführten Annahmen haben eine analytische Lösung des gesuchten Minimums ermöglicht, eine Lösung für welche der Einfluß der einzelnen Parameter gesondert verfolgt werden kann; andererseits

wird bei der Bestimmung des Optimums die Möglichkeit ihrer gleichzeitigen Veränderung in Betracht gezogen.

In der Arbeit wird das Minimum der Selbstkosten nacheinander für $\nu = 1$, $\nu =$ als Parameter, ν optimal untersucht.

Auf Grund der Analyse der ermittelten analytischen Ausdrücke, wie auch aus den für einen Transformator mit Kupfer -, bzw. Aluminiumwicklungen, durchgeführten konkreten Rechenbeispielen, werden wertvolle Schlüsse über den Einfluß der verschiedenen technisch-ökonomischen Parameter auf die Ausführung der Transformatoren und auf die Kurzschlußspannung gezogen.

BIBLIOGRAFIE

1. N. I. BULGACOV, *Calculul transformatoarelor.* Ed. tehnică, Bucureşti, 1951.
2. J. KREUZER, *Grosstransformatoren.* Elin Zeitschrift, **XII**, *2*, 1—14 (1960).
3. P. G. LAURENT, *Considération sur le dimensionnement optimum économique des transformateurs de distribution publique.* Bull. de la Société Française des Electriciens, **V**, *57* (1955).
4. P. G. GRUNDINSKI, *Cu privire la calculul capacităţii de încărcare la transformatoarele de putere.* Elektriceskie stanţii, **28**, *3*, 61—70 (1957).
5. I. POPOV, *Die Bestimmung der grundsätzlichen Parameter bei einer Serie von Leistungstransformatoren.* Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Elektrotechnik-Ilmenau, **5**, 125—132 (1959).
6. — *Eine neue Methode zur Bestimmung der optimalen Abmessungen der Kerne von Leistungstransformatoren.* Deutsche Elektrotechnik, **12**, *7*, 243—248 (1958).
7. И. М. ПОСТНИКОВ, *Экономические потери и размеры электромашин и трансформаторов.* Электричество, *9*, I — 9(1961).
8. C. APETREI, *Determinarea prin calcul a optimului tehnico-economic la transformatoarele de putere.* St. cerc. energ., **XII**—A, *4* (1962).
9. D. CRETU, M. BÎRGĂUANU, P. OPRIŞAN, *Influenţa variaţiei indicilor tehnico-economici asupra soluţiei optime a transformatoarelor de putere.* St. cerc. energ., **XIII**-A, *1* (1963) (acest volum).

CU PRIVIRE LA DETERMINAREA SOLUȚIILOR OPTIME ALE UNEI SERII UNITARE DE TRANSFORMATOARE DE PUTERE PE BAZĂ DE CONSIDERENTE TEHNICE ȘI ECONOMICE

DE

M. E. BÎRGĂUANU, D. V. CREȚU și C. V. BĂLĂ

621.314.2.012.003

1. INTRODUCERE

Prezenta lucrare se referă la seria unitară de transformatoare trifazate de putere de 6,3—63 MVA și 110 kV cu reglaj sub sarcină cu înfășurare de aluminiu, avînd miezul executat din tablă silicioasă texturată.

S-a ales pentru studiu seria cu parametri de mai sus avînd în vedere iminența introducerii în producția industriei noastre a unei astfel de serii.

Drept puteri nominale de bază s-au adoptat cele din seria cu rația 1,6 recomandată de CAER și anume : 6,3 ; 10 ; 16 ; 25 ; 40 și 63 MVA. Valorile discrete adoptate mai sus pentru puterea nominală nu limitează valabilitatea studiului care se referă la o gamă continuă de puteri cuprinsă între valorile extreme ale seriei.

În cele ce urmează se urmărește stabilirea optimului tehnico-economic al acestei serii. Pentru determinarea optimului fiecărui transformator în parte s-a folosit metoda indicată de I. Popov [1] și concluziile trase din studiul influenței variației indicilor tehnici și economici concretizat pe transformatorul de 10 mVA [2].

Pentru costul materialelor active s-au adoptat valorile indicate în cataloagele în vigoare și anume : costul oțelului silicios laminat la rece m_{Fe} = =13 lei/kg iar costul aluminiului blanc pentru înfășurări $m_{Al} = 27$ lei/kg.

Ținînd seama de experiența industriei noastre constructoare de transformatoare prețul miezului este $m_{Fe} = 15{,}50$ lei/kg și al înfășurării gata confecționate $m_{Al} = 39$ lei/kg, valori ce au fost introduse în prezentul studiu.

Pentru considerarea contribuției cheltuielilor de exploatare la costul anual al transformatorului s-a adoptat un cost specific mediu al energiei electrice, furnizate la barele transformatorului, de 0,15 lei/kWh în care se include costul combustibilului, remunerarea personalului de deservire, reparații curente și consumul de energie în serviciile auxiliare. În acest cost specific nu au fost introduse cheltuielile de investiții suplimentare necesitate de acoperirea pierderilor în transformator așa cum se consideră în unele lucrări deoarece de ele se ține seama explicit în relația de calcul a costului anual al transformatorului [1], [2], [4]; aceasta se justifică prin faptul că investițiile suplimentare se fac o dată cu construcția transformatorului pe cînd cheltuielile pentru costul energiei se eșalonează de-a lungul întregului timp de recuperare.

Timpul de recuperare adoptat este cel normat pentru industria noastră electrotehnică $i = 10$ ani; influența mică a acestui indice asupra soluției optime permite extrapolarea rezultatelor obținute în [2],[5] asupra întregii serii.

Inducția magnetică în coloană s-a considerat constantă și anume $B_a = 1{,}65$ T, deși transformatorul optim se obține pentru inducții mai mici; așa cum arată studiul asupra transformatorului de 10 MVA valoarea inducției influențează puțin asupra costului anual al transformatorului și aproape de loc asupra pierderilor de scurtcircuit corespunzătoare transformatorului optim. Alegerea valorii inducției magnetice în coloană influențează diametrul coloanei; mai puțin influențată este înălțimea ferestrei iar asupra lățimii ferestrei practic nu se resimte nici o influență.

De aceea la proiectarea concretă a transformatoarelor din serie se vor alege inducții mai mici dacă sporul în greutate al transformatoarelor nu contravine condițiilor tehnice impuse.

Factorul ε ce caracterizează utilizarea transformatorului la putere maximă [1], [2], avînd o influență hotărîtoare atît asupra dimensiunilor transformatorului optim cît și asupra pierderilor de scurtcircuit este adoptat, în lucrarea de față, ca parametru de bază, urmărindu-se în special optimul seriei pentru valoarea medie a factorului $\varepsilon = 0{,}3$ și valorile limită $\varepsilon = 0{,}1$ și $0{,}5$.

Pentru ceilalți indici folosiți în studiul de față s-au admis valorile medii indicate în anexa 1.

2. STABILIREA PIERDERILOR DE SCURTCIRCUIT NOMINALE

În scopul determinării soluției optime a transformatoarelor din gama de putere studiată este necesar să se calculeze pentru fiecare transformator în parte costul total anual, funcție de pierderile de scurtcircuit considerate ca parametru în sistemul de ecuații stabilit de metoda I. Popov.

Din curba costului total anual în funcție de pierderile de scurtcircuit se determină minimul pentru fiecare transformator în parte și se determină pierderile de scurtcircuit corespunzătoare acestui minim. Minimul se determină în funcție de diferiții indici ε care caracterizează durata de funcționare la pierderi de scurtcircuit nominale date.

În figura 1 se reprezintă aceste curbe calculate, și anume prin linii continue groase pentru $\varepsilon = 0{,}3$ (care se referă la soluția care o considerăm de bază) cu linii întrerupte pentru $\varepsilon = 0{,}5$ iar cu linii continui subțiri pentru limita inferioară considerată în calcule $\varepsilon = 0{,}1$. Urmărind costurile anuale minime pentru întreaga serie de puteri și pentru fiecare indice ε se poate determina dependența costurilor minime de pierderile de scurtcircuit nominale.

Din diagrama 1 rezultă că locurile geometrice ale costurilor minime ale transformatoarelor de diferite puteri sînt drepte, care, trec prin origine.

În acest mod se pot stabili pierderile de scurtcircuit nominale care corespund transformatoarelor optime de diferite puteri la ε dat. Pe baza rezultatelor din figura 1, în figura 2, s-au reprezentat separat pierderile de scurtcircuit nominale ce trebuie adoptate pentru transformatoarele optime funcție de puterea nominală S_n a acestora. Din diagramă se poate constata că pierderile de scurtcircuit „optime" cresc în valoare absolută pe măsură ce indicele ε scade.

Pierderile de scurtcircuit corespunzătoare costului total minim al transformatorului determinate mai sus pentru δ anumită valoare a indicelui ε, sînt luate de bază în determinarea caracteristicilor constructive.

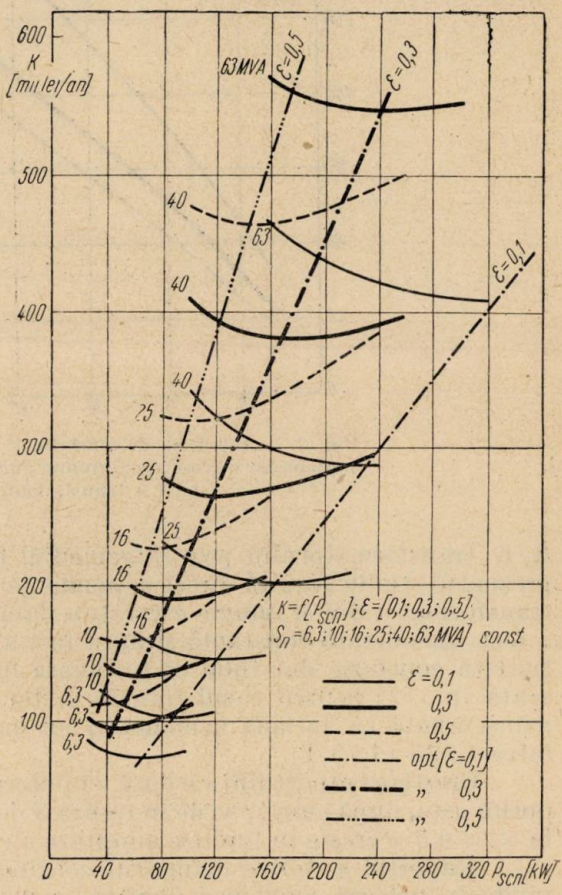


Fig. 1. — Costul anual al transformatoarelor din seria de 110 kV funcție de valoarea pierderilor de scurtcircuit nominale pentru diferite valori ale factorului ε.

3. FACTORII DE SILUETĂ ȘI DIMENSIUNILE OPTIME

În figura 3 sînt reprezentate variațiile factorilor de siluetă $y = D/F = F(S_n)$ (diametrul cercului circumscris coloanei transformato-

rului D raportat la lățimea ferestrei F) și $x = H/F$ (înălțimea ferestrei H raportată la aceeași lățime) funcție de puterea transformatorului.

Spre deosebire de concluziile din [3] din care rezultă că pentru transformatorul optim factorul de siluetă H/F depinde de puterea nominală

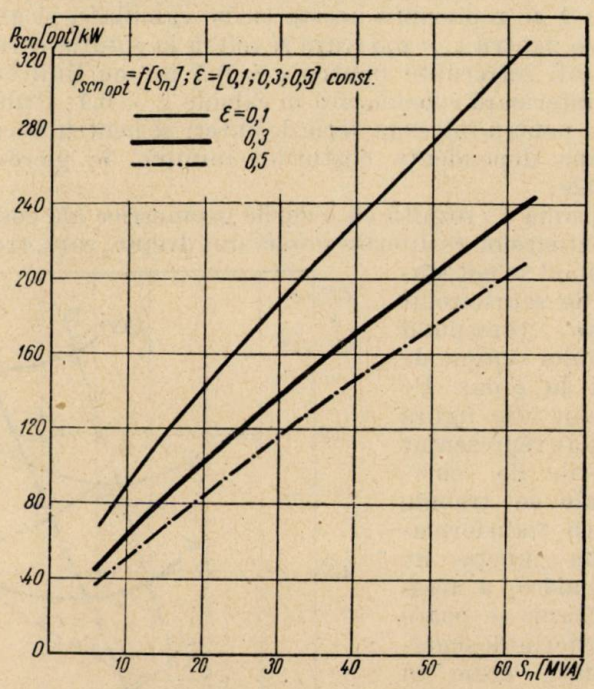


Fig. 2. — Pierderile de scurtcircuit nominale ale transformatoarelor cu cost anual minim funcție de puterea nominală a transformatorului.

S_n a transformatorului prin intermediul factorului de umplere total din prezentul studiu rezultă direct dependența factorului, în raport cu puterea transformatorului și anume x crește o dată cu puterea. Faptul că inducția a fost considerată constantă și nu a fost aleasă cea optimă nu împietează această concluzie dat fiind că influența lui B_a asupra lui x, așa cum se arată în [2] pentru cazul transformatorului de 10 MVA, este cu totul neînsemnată (x variază nemonoton cu mai puțin de 1% la B_a cuprins între 1,525—1,75 T).

Creșterea raportului x o dată cu puterea nominală a transformatorului optim este, după cum se vede în figura 3 destul de importantă, de exemplu la $\varepsilon = 0{,}3$ x crește în limitele adoptate ale seriei cu aproape 25%.

Raportul y dintre diametrul coloanei D și lărgimea ferestrei F depinde în măsură și mai mare de puterea nominală a transformatorului (de exemplu în limitele gamei de puteri alese y crește o dată cu puterea cu 47%).

Se poate desprinde concluzia că pe măsura creșterii puterii transformatorului miezul acestuia își schimbă proporția în sensul înălțării dar și a îngroșării lui care, raportată la înălțime, este mai pronunțată (H/D scade cu creșterea puterii nominale a transformatorului).

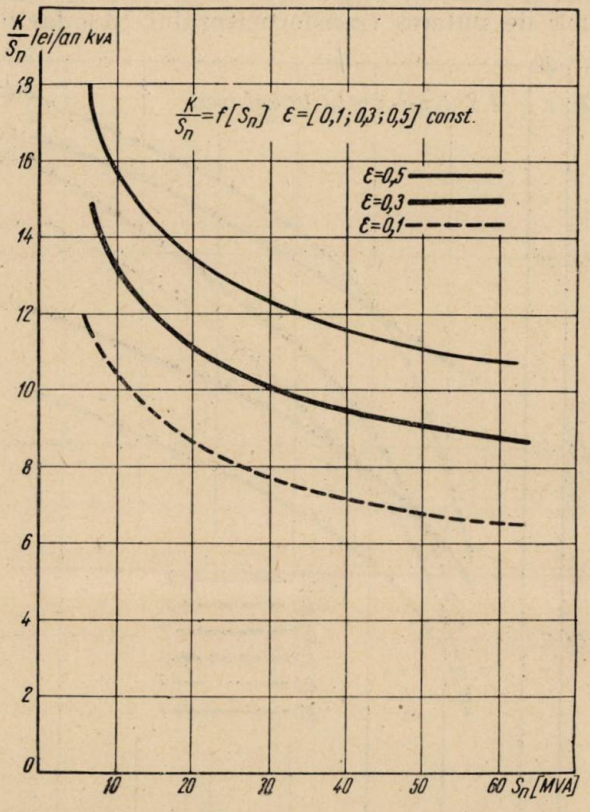


Fig. 3. — Factorii de siluetă $x = H/F$ și $y = D/F$ ai transformatoarelor cu cost anual minim funcție de puterea nominală, pentru diferite valori ale lui ε.

Concluziile rezultate din analiza figurii 3 sînt confirmate și concretizate în figura 4, unde s-au reprezentat dimensiunile principale ale transformatorului funcție de puterea lui nominală. Evident dimensiunile cresc o dată cu puterea.

Datele reprezentate în figura 4 sînt încă susceptibile de o interesantă interpretare. Reprezentarea curbelor din această figură care în plan logaritmic devin drepte permite recunoașterea de legități sub forma unor funcții de puteri, variabilă fiind puterea transformatorului. Adică

atît înălțimea H și lățimea F a ferestrei, cît și diametrul cercului circumscris coloanei D, se pot reprezenta prin relațiile *exacte*

$$H = a\, S_n^b,\quad F = c\, S_n^d,\quad D = e\, S_n^l.$$

Coeficienții și exponenții din relațiile de mai sus sînt evident funcție de indicii tehnici și economici care determină seria de transformatoare și sînt independenți de puterea transformatorului. Așadar în condiții eco-

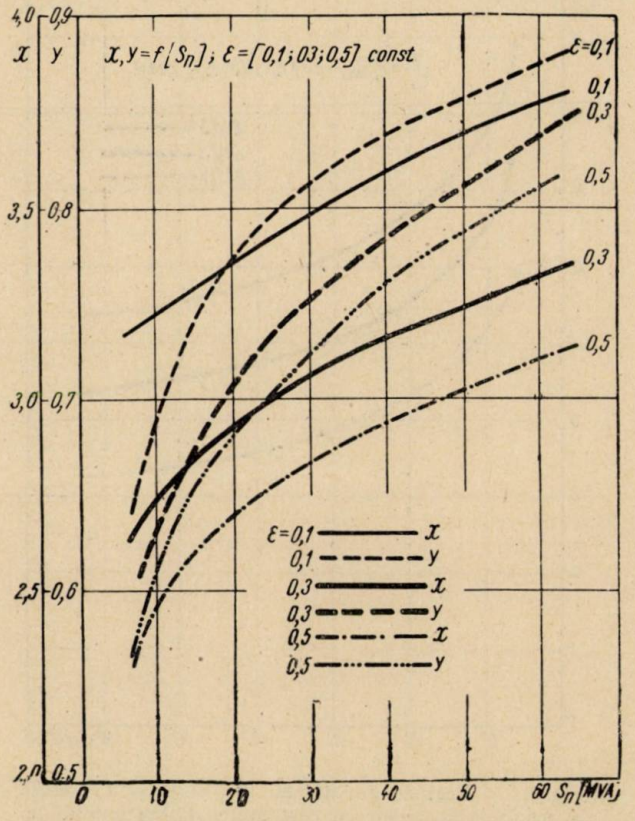


Fig. 4. — Dimensiunile ferestrei și diametrul cercului circumscris coloanei transformatorului optim, funcție de puterea nominală pentru diferiți ε.

nomice și de exploatare date se pot determina prin relații simple dimensiunile principale ale transformatorului. Dăm aceste relații pentru transformatorul destinat a funcționa la un indice

$\varepsilon = 0{,}3$ (ceilalți indici fiind cei aleși anterior),

$$H = 10{,}3\, S_n^{0{,}246} \approx H = 10\ \ S_n^{1/4}$$

$$F = 4{,}45\, S_n^{0{,}148} \approx F = 4{,}5\ \ S_n^{3/20}$$

$$D = 2{,}22\, S_n^{0{,}275} \approx D = 2{,}25\ \ S_n^{3/8}$$

(dimensiunile transformatorului rezultă în dm, puterile fiind exprimate în MVA).

Rotunjirea coeficienților și exponenților nu reprezintă folos practic în proiectare ci numai pentru evidențierea unei legități. În proiectare este utilă folosirea coeficienților și exponenților rezultați din calcule și pentru care în parte se dau indicații în tabela 1 (cu semnificațiile din relațiile generale precedente).

Tabela 1

	a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
0,1	2,06	0,289	10,6	0,242	4,97	0,140
0,3	2,26	0,275	10,3	0,246	4,55	0,148
0,5	2,44	0,268	10	0,249	4,20	0,158

Este fără îndoială că atît coeficienții cît și exponenții care, după cum rezultă din tabel, sînt funcții de ε dar desigur și de alți indici tehnici economici, ar putea fi reprezentați ca funcții de acești indici.

Materialul calculat de care dispunem ne permite numai în parte această analiză. Ne limităm în cele de față de a prezenta numai perspectivele. Într-o lucrare ulterioară se vor putea aduce noi contribuții privind această problemă.

4. PIERDERILE DE MERS ÎN GOL, PUTEREA DE MAGNETIZARE ȘI COSTUL MATERIALELOR ACTIVE

Pentru competiția „cost de fabricație — cost de exploatare" prezintă importanță pe de o parte costul materialelor active uzinate M, pe de altă parte pierderile de mers în gol active P_0 și reactive Q_0. Figura 5 scoate în evidență modul în care acestea variază funcție de puterea nominală pentru diferite valori ale indicelui ε. Firește toate aceste mărimi cresc o dată cu puterea și ar prezenta interes raportarea acestora de exemplu la puterea nominală și, mai potrivit, la energia transformată anual.

Ne mulțumim cu raportarea valorilor corespunzătoare puterilor de 10 MVA respectiv de 60 MVA la puterea nominală 10 MVA respectiv la 60 MVA. Valorile raportate reprezintă o putere de utilizare la pierderi de scurtcircuit nominale. Tabela 2 sintetizează rezultatele acestei operații.

Se constată astfel că valorile costului materialelor active și pierderilor de mers în gol — active și reactive — raportate la puterea nominală a transformatorului urmează aceeași lege de variație, cresc cu ε cînd puterea se menține constantă și scad o dată cu creșterea puterii nominale cînd ε este menținut constant.

Aceleași valori raportate însă la gradul de utilizare a puterii nominale a transformatorului — ε. S_n — scad cînd ε și S_n cresc ; pentru limitele de variație adoptate ale acestor doi parametri se constată că ε are o in-

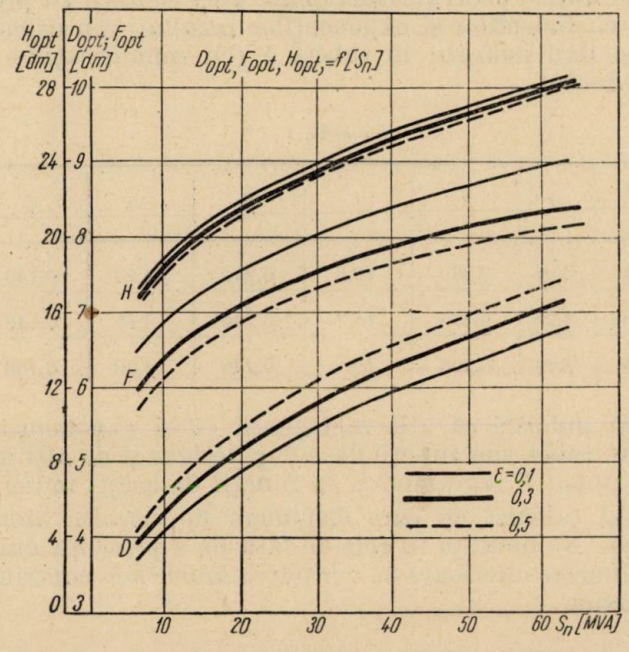


Fig. 5. — Costul materialelor active și valoarea pierderilor de mers în gol, active și reactive, funcție de puterea nominală a transformatorului, pentru $\varepsilon = 0{,}1$; 0,3 și 0,5.

Tabela 2

S_n MVA	ε	M (mii) lei	P_0 kW	Q_0 kVAR	M/S_k mii lei / MVA	P_0/S_n kW / MVA	Q_0/S_n kVAR / MVA	$M/\varepsilon\ S_n$ mii lei / MVA	$P_0/\varepsilon\ S_n$ kW / MVA	$Q_0/\varepsilon\ S_n$ kVAR / MVA
10	0,1	205	13	100	20,5	1,3	10,0	200,5	13,0	100,0
	0,3	255	18	128	25,5	1,8	12,8	85,5	6,0	42,9
	0,5	293	22	142	29,3	2,2	14,2	50,85	4,4	47,4
60	0,1	800	60	416	13,3	1,0	6,95	133,0	10	69,5
	0,3	925	69	465	15,5	1,15	7,87	51,7	3,83	26,4
	0,5	1 005	73	480	16,8	1,22	8,00	33,5	2,43	18

fluență mult mai mare decît puterea — S_n. Energia unitară transformată va reveni astfel mult mai avantajoasă la transformatoarele optime de putere mai mare și mai încărcate.

5. COSTUL TOTAL ANUAL. COMPONENTELE COSTULUI

Alegerea transformatorului cel mai economic, funcție de timpul de utilizare și de puterea nominală s-a făcut în urma determinării costului total anual minim. Curbele din figura 6, pentru trei valori ale factorului

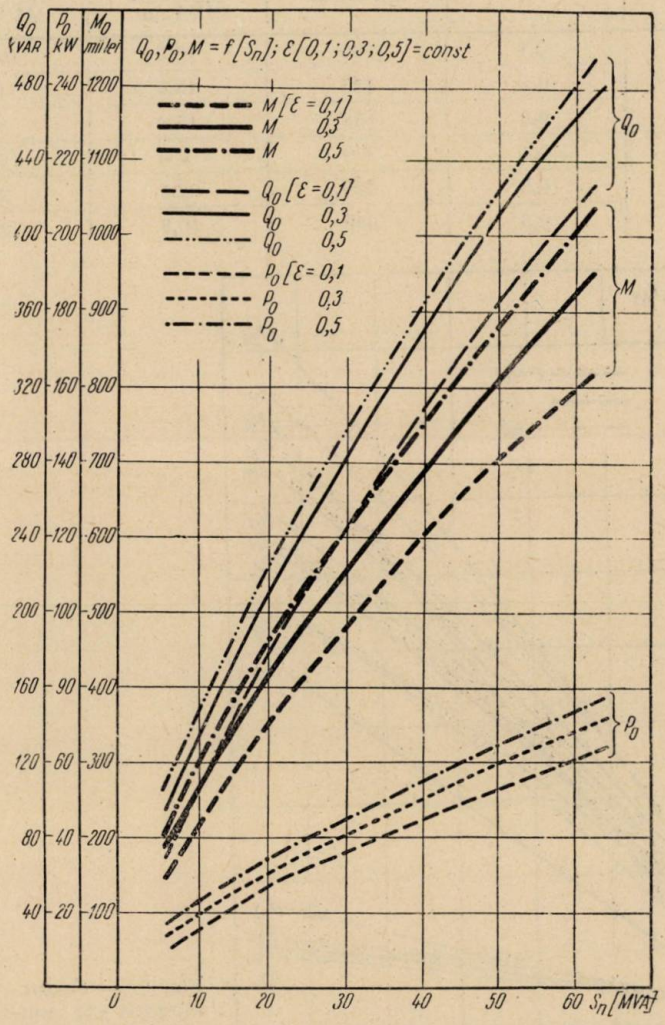


Fig. 6. — Costul anual al transformatoarelor optime funcție de puterea nominală pentru diferiți factori de utilizare.

de utilizare — ε — reprezintă costurile minime ale transformatorului din serie. Excluzînd valorile limite ale puterilor din serie, se poate aproxima ca liniară variația lui K în funcție de puterea nominală, panta caracteristicii fiind proporțională cu ε. În tabela 3 sînt prezentate valorile lui K, K/S_n și $K/\varepsilon S_n$ pentru $\varepsilon = 0{,}1$; 0,3 și 0,5 și $S_n = 10$ și 60 MVA.

Tabela 3

S_n	ε	K	K/S_n	$K/\varepsilon S_n$
MVA	—	mii lei/an	$\frac{\text{mii lei}}{\text{MVA an}}$	$\frac{\text{mii lei}}{\text{MVA an}}$
10	0,1	105	10,5	105
	0,3	135	13,5	45
	0,5	158	15,8	31,6
60	0,1	390	6,5	65
	0,3	520	8,65	28,9
	0,5	650	10,8	21,6

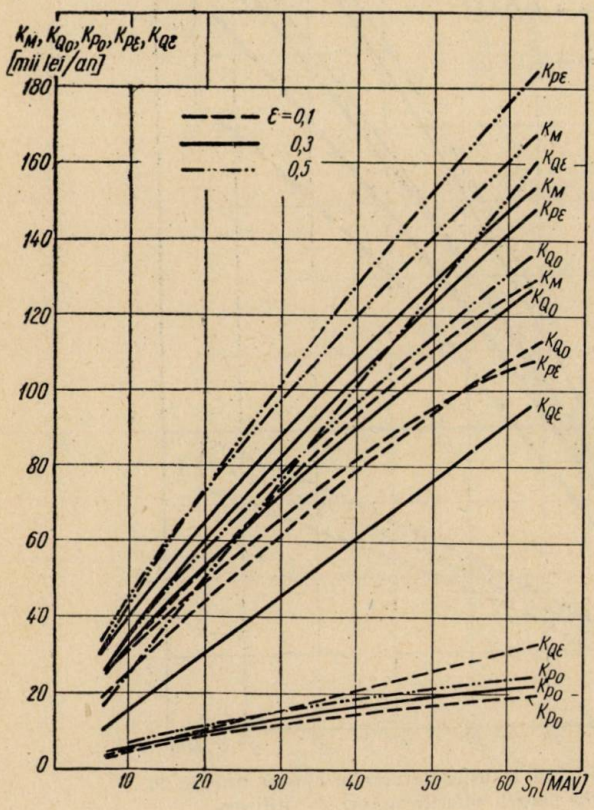


Fig. 7. — Costul anual minim raportat la puterea nominală funcție de puterea nominală pentru $\varepsilon = 0{,}1$, 0,3 și 0,5.

Concluziile ce se pot trage din acest tabel sînt identice cu cele de la paragraful precedent și sînt confirmate de curbele din figura 7 unde s-a reprezentat costul total anual raportat la puterea nominală funcție de puterea nominală pentru factorii de utilizare — ε — amintiți anterior.

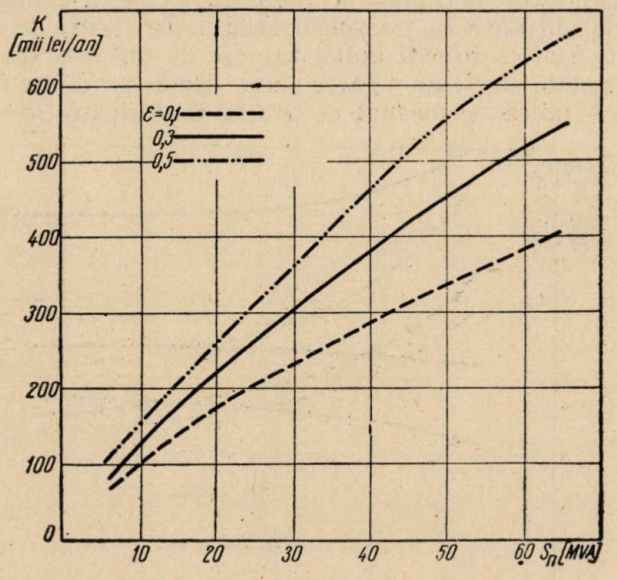


Fig. 8. — Componentele costului total anual al transformatorului funcție de puterea nominală pentru diferite valori ale factorului de utilizare.

În vederea urmăririi mai în detaliu a variației costurilor parțiale anuale ale transformatoarelor optime de puteri cuprinse în limitele seriei analizate reproducem în figura 8 curbele, costul anual al materialelor K_M, costul anual al pierderilor de mers în gol — active K_{P0} și reactive K_{Q0} și costul pierderilor de funcționare în sarcină — active $K_{\varepsilon 1}$ — și reactive — $K_{\varepsilon 2}$ — funcție de puterea nominală și pentru diferiți factori ε.

Aceste costuri anuale parțiale cresc aproximativ liniar cu creșterea lui ε și S_n. Ponderea cea mai mare în costul total anual o au componentele K_M, $K_{\varepsilon 1}$, după care urmează K_{P0}, $K_{\varepsilon 2}$; costul anual al puterii de magnetizare — K_{Q0} — are o contribuție redusă la costul anual total.

6. NIVELUL PIERDERILOR

În ultimul timp, în construcția de transformatoare, se constată creșterea raportului dintre pierderile din materialul conductor și pierderile în fier. Această tendință este justificată de progresele obținute în elaborarea oțelurilor silicioase cu caracteristici îmbunătățite și de lărgirea bazei de criterii puse la baza determinării dimensiunilor transformatoarelor.

Dacă acum patruzeci de ani pierderile în materialul conductor erau de același ordin de mărime, indiferent de putere, în prezent se construiesc transformatoare cu pierderi în cupru de cîteva ori mai mari decît cele în fier.

Această creștere a raportului pierderilor este în deplină concordanță cu rezultatele obținute în prezentul studiu. În figura 9 s-a reprezentat acest raport pentru diferiți indici funcție de puterea transformatorului optim. Se constată că pe de o parte acest raport scade pe măsură ce indicele ε crește — adică pe măsură ce timpul de utilizare la putere maximă

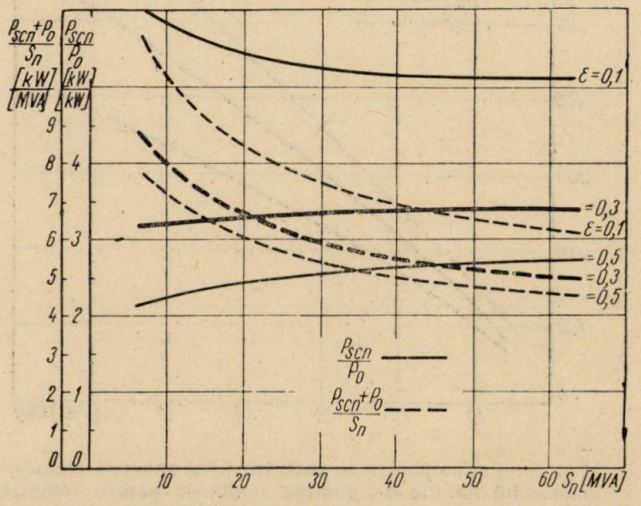


Fig. 9. — Raportul dintre pierderile de scurtcircuit și de mers în gol și raportul dintre pierderile totale din transformator și puterea nominală funcție de puterea nominală pentru ε = 0,1, 0,3 și 0,5.

crește — iar pe de altă parte că acest raport nu este independent de putere și anume pentru transformatoarele puțin încărcate scade pe măsură ce puterea crește iar pentru cele mai încărcate, dimpotrivă, o dată cu puterea crește și valoarea raportului.

Raportul dintre suma pierderilor nominale și puterea nominală prezintă importanță în privința aprecierii randamentului transformatorului în diferitele regimuri de funcționare. În figura 9 se reprezintă curbele P_{scn}/P_0 și $(P_{scn}+P_0)/S_n$ obținute pentru transformatoarele optime din seria de transformatoare funcție de puterea nominală pentru diferiți factori de utilizare ε.

7. CONCLUZII

1. Prețul de cost anual minim pentru transformatoarele din seria de 110 kV este funcție de puterea nominală S_n și de factorul de utilizare a puterii nominale ε.

2. Valoarea pierderilor nominale de scurtcircuit a transformatoarelor optime de putere date este mult influențată de factorul de utilizare ε.

Pe măsură ce durata de utilizare la putere maximă crește pierderile de scurtcircuit nominale pentru transformatorul optim scad. Această valoare este comparabilă cu cea corespunzătoare seriei unitare de 35 kV realizată cu înfășurări de aluminiu, proiectată de asemenea pe baze tehnico-economice.

Față de prevederile normelor sovietice (ГОСТ — 401—41) privind seria de transformatoare trifazate cu două înfășurări de 110 kV pierderile de scurtcircuit pentru transformatoarele optime stabilite în prezenta lucrare se situează la un nivel mult mai scăzut. Aceasta se explică prin faptul că probabil la determinarea datelor din ГОСТ 401—41 nu s-a avut în vedere cheltuielile necesitate de acoperirea pierderilor de scurtcircuit.

3. Factorii de siluetă pentru transformatoarele optime din seria de 110 kV, în ipoteza tensiunii de scurtcircuit date și constante, sînt funcție atît de putere cît și de factorul ε. Atît x cît și y cresc cu puterea transformatorului și scad cu creșterea lui ε.

4. Dimensiunile principale ale transformatorului, cum e și firesc, cresc cu puterea însă nu în aceeași măsură.

În mod relativ miezul transformatorului se îngroașă iar fereastra se îngustează. Înălțimea și lărgimea ferestrei scad pe măsură ce ε crește, diametrul însă crește o dată cu ε.

5. Pentru dimensiunile principale ale transformatorului optim se pot stabili relații simple funcție de puterea transformatorului permițînd interpolarea și extrapolarea și pentru altă gamă de puteri.

6. Costul materialelor active crește simțitor cu puterea și totodată cu timpul de utilizare. Raportat la puterea nominală a transformatorului costul materialelor active scade pe măsură ce puterea crește și crește cu ε. Raportat atît la putere cît și la ε sensul de variație al costului materialelor active este același (ca mai sus) pe de altă parte însă scade sensibil cu creșterea lui ε, ceea ce echivalează cu o scădere a prețului de cost al materialelor active raportat la energie unitară transformată prin utilizarea intensivă a unităților de puteri mai mari.

7. Pierderile de mers în gol și puterea de magnetizare pentru transformatorul optim, atît în valori absolute cît și relative cresc cu durata de utilizare. Raportate la puterea nominală ele scad pe măsură ce puterea nominală crește. Dacă aceste pierderi se raportează atît la puterea nominală cît și la indicele ε se constată, ca și în cazul materialelor active, avantajele utilizării intensive a unităților de mare putere.

8. Față de normele ГОСТ —401—41 pierderile de mers în gol și puterea de magnetizare (deci și curentul de magnetizare) sînt cu mult mai mici în seria considerată aici.

Acest lucru se explică în principal prin utilizarea oțelului electrotehnic de calitate superioară (tablă laminată la rece).

9. Raportul pierderilor din materialul conductor și din fier depind de puterea nominală în mod diferit după cum ε are o valoare mai mare sau mai mică. Astfel la $\varepsilon = 0{,}1$ raportul acestor pierderi scade cu creșterea

puterii pe cînd la $\varepsilon = 0{,}3$ și 0,5 acest raport crește. Acest raport este cu atît mai mare cu cît timpul de utilizare este mai scurt.

Suma pierderilor din transformator raportată la puterea nominală scade substanțial o dată cu creșterea puterii și a duratei de utilizare.

Tendința modernă în construcția transformatoarelor, în deplină concordanță cu rezultatele studiului de față, constă în majorarea raportului dintre pierderile de scurtcircuit și pierderile de mers în gol (de la dublu pînă la de 6 ori funcție de ε).

10. Concluziile de la 6 și 7 sînt valabile și în privința costului total anual al transformatorului optim.

11. Prezentul studiu poate servi prin datele și concluziile sale drept bază pentru proiectarea (în țara noastră) concretă a seriei de transformatoare considerată. Parțial, această lucrare poate fi utilă în proiectarea unor transformatoare de alte tipuri și puteri decît cele considerate. Lucrarea poate fi utilă și la alegerea caracteristicilor transformatorului celui mai indicat din puncte de vedere al costului total anual destinat a funcționa în locul caracterizat de durata de utilizare dată.

ANEXA 1

S_u	6,3	10	16	25	40	63
λ	0,86	0,85	0,83	0,81	0,78	0,74
K_{Al}	0,410	0,415	0,420	0,425	0,430	0,435

ZUR FRAGE DER BESTIMMUNG DER OPTIMALLÖSUNGEN EINER EINHEITS—REIHE VON LEISTUNGSTRANSFORMATOREN NACH TECHNISCHEN UND ÖKONOMISCHEN ERWÄGUNGEN

ZUSAMMENFASSUNG

Von technischen und ökonomischen Erwägungen ausgehend, wird eine Reihe von 110 kV 6,3 ... 63 MVA-Transformatoren untersucht. Hierbei werden für Transformatoren die Bedingungen aufgestellt, bei denen sich die geringsten Jahreskosten für verschiedene Betriebsjahre unter Höchstleistung ergeben. Es werden einige Größen dieser Transformatoren, wie Kurzschlußverluste, Hauptabmessungen, Schenkeldurchmesser, Höhe und Breite des Fensters und das Verhältnis dieser Maße zueinander bestimmt. Einfache genaue und annähernde analytische Beziehungen zwischen den Hauptabmessungen und der Nennleistung der Transformatoren werden aufgestellt. Weiterhin werden die Leerlaufverluste und die Magnetisierungsleistung dieser Transformatoren, sowie die Kosten der aktiven Werkstoffe in bearbeitetem Zustand (Herstellungskosten des aktiven

Teiles) in absoluten Werten und in bezug auf die Nennleistung ermittelt. Die Komponenten der jährlichen Kosten des Optimaltrafos unter verschiedenen Annahmen hinsichtlich der Betriebsjahre bei maximalen Kurzschlußverlusten werden untersucht. Das Verhältnis zwischen Kurzschluß- und Leerlaufverlusten wird aufgezeigt und die Tendenz hervorgehoben, dieses mit der Entwicklung des Transformatorenbaues zu erhöhen. Daraus werden nutzbringende Schlußfolgerungen sowohl für die Auslegung einer solchen Transformatorenreihe, als auch für die Auswahl eines Transformators gezogen, der einem gegebenen Einsatzort bei bestimmten Betriebsjahren unter Höchstleistung am besten entspricht.

BIBLIOGRAFIE

1. L. POPOV, *Eine Methode zur Bestimmung der optimalen Abmessungen der Kerne von Leistungstransformatoren.* Deutsche Elektrotechnik, **12**, 7, 243—248 (1958).
2. D. CRETU, M. BÎRGĂUANU, P. OPRIȘAN, *Influența variației indicilor tehnico-economici asupra soluției optime a transformatoarelor de putere.* St. și cerc. de energ., *1* (1963) (acest volum).
3. C. BĂLĂ, A. CUPȘA, *Determinarea optimului tehnico-economic absolut în proiectarea transformatoarelor de putere.* St. și cerc. de energ., *1* (1963) (acest volum).
4. C. APETREI, *Determinarea prin calcul a optimului tehnico-economic la transformatorul de putere.* St. și cerc. de energ., *4* (1962).
5. M. BÎRGĂUANU, D. CRETU. *Transformatoare cu cupru sau cu aluminiu?.* St. și cerc. de energ., *3* (1963) (sub tipar).

STUDII PRIVIND PROBLEMA REDUCERII NIVELULUI DE IZOLAȚIE AL ECHIPAMENTULUI STAȚIILOR DE 110 kV*)

DE

DORIN COSTINA, BALÁSZ MÁTHÉ și VALERIU STANCIU

621.316.262.015.52

Pînă în ultimii ani, nivelul de izolație al echipamentului electric de înaltă tensiune s-a asigurat prin proiectare și încercări de platformă, conform unor norme, prescripții și standarde naționale statornicite acum 20 de ani. În acea perioadă (decęniile 4 și 5) au existat puține cercetări teoretice profunde sau experiențe suficiente, pentru ca să se tragă concluzii certe pe baza unei statistici științifice privind natura și mărimea reală a solicitărilor care apar în izolație la funcționare în regim normal sau în regim de avarie. În acel timp, dispozitivele de protecție contra supratensiunilor (descărcătoarele de toate tipurile, rezistențe de șuntare și înseriere la întreruptoare etc.) nu erau încă dezvoltate suficient din punct de vedere teoretic și practic. În ultimii ani însă, problema revizuirii condițiilor care trebuie să fie impuse izolației echipamentului electric al stațiilor și liniilor, a devenit o preocupare centrală la mulți specialiști din multe țări [1] ... [7].

În cercetarea teoretică a supratensiunilor s-a putut ajunge la elaborarea unor concepții destul de unitare [8], [9], [10]; se cunosc rezultatele multor măsurători practice din exploatare, de genul celor din [11], [12], [13]. Industria electrotehnică a făcut serioase progrese în ultimii ani în fabricarea mijloacelor de protecție contra supratensiunilor atmosferice [4], [14].

În U.R.S.S. s-a elaborat construcția și tehnologia unei noi rezistențe neliniare *tervit* care după performanțele sale stabilite prin încercări [15] depășește din toate punctele de vedere (în special la capacitate de

*) Lucrare prezentată la Sesiunea de comunicări a Institutului de energetică al Academiei R.P.R., din 30—31 martie 1962.

trecere şi la caracteristica volt-amper) discurile de vilit (folosit în U.R.S.S.) sau discurile de tirit (folosit în ţările Europei occidentale şi S.U.A.). Descărcătoarele tip ventil, construite pe baza acestor rezistenţe pot limita atît supratensiunile externe cît şi interne chiar fără eclatori de amorsare, avînd o stabilitate şi rezistenţă la umezeală ridicată.

Problema echivalării solicitărilor ivite în exploatare în izolaţie cu cele de la platforma de încercare s-a rezolvat satisfăcător în cazul supratensiunilor externe prin acceptarea largă a tensiunii aperiodice de impuls convenţionale (1,2/50 μs) şi a curentului de trăznet convenţional (8/20 μs). În mod asemănător există tentative de *a simula* [16] printr-un impuls aperiodic (250/1 000 μs sau 1 000/2 000 μs) sau oscilant supratensiunile interne (această problemă însă este mult mai greu de rezolvat în cazul supratensiunilor interne ca în cazul supratensiunilor de origină externă).

Reducerea nivelelor de izolaţie şi reconsiderarea concepţiilor înrădăcinate în acest domeniu în condiţiile arătate mai sus a devenit o problemă de actualitate în special dacă se au în vedere urmările tehnico-economice (reducerea gabaritului şi greutăţii produselor, obţinerea unor construcţii transportabile mai uşor şi amplasabile mai ieftin, reducerea preţului de cost al produselor şi al instalaţiilor complete) pe care ar putea să le aducă pentru practică. În acest sens problema reducerii nivelelor de izolaţie poate să devină o problemă cheie atît pentru industria constructoare de echipament electric de înaltă tensiune, cît şi pentru exploatare. Bineînţeles că nu se poate trece dintr-o dată la nivele de izolaţie reduse, chiar dacă în acest sens există o experienţă de exploatare îndelungată din alte ţări, fără un studiu prealabil şi concret privind condiţiile de lucru al echipamentului electric utilizat în sistemele energetice ale R.P.R.

Lucrarea de faţă analizează posibilitatea reducerii nivelelor la o singură clasă de izolaţie, la 110 kV, ocupîndu-se numai de izolaţia echipamentului substaţiilor fără să cuprindă problema izolaţiei liniilor şi a barelor. Reducerea izolaţiei preconizată de autori afectează numai produsele fabricate de uzinele Electroputere-Craiova şi montate în substaţiile de 110 kV de tip exterior în diferitele regiuni ale ţării.

1. SOLICITĂRILE IZOLAŢIEI ECHIPAMENTULUI ELECTRIC AL STAŢIILOR

În condiţiile normale de exploatare, calea de curent a echipamentului electric se află sub tensiunea nominală de serviciu a reţelei atingînd cel mult valoarea tensiunii maxime de lucru (de exemplu în reţelele de 110 kV, 121, 123 sau 126 kV — valoarea exactă încă nu este precizată la noi în ţară). Din motive, diferite, dependente sau independente de funcţionarea reţelei, într-un punct sau într-alt punct al sistemului electroenergetic tensiunea poate să depăşească aceste valori nominale, pot să apară creşteri de tensiune sau supratensiuni (cele două noţiuni se referă la lucruri distincte) adică cîmpuri electrice periculoase în construcţia izolantă. În funcţie de originea lor, supratensiunile se împart în două categorii mari :

1) Supratensiuni externe sau supratensiuni atmosferice,
2) Supratensiuni interne.

Cele mai periculoase *supratensiuni externe*, iau naștere în cazul unor lovituri directe de trăznet în conductorii liniei aeriene, în stîlpii de susținere (amorsări inverse datorită rezistenței mari de scurgere la pămînt a curentului de trăznet) și în barele stației. Supratensiunile produse datorită loviturilor directe de trăznet pot să atingă într-un punct al sistemului cîteva mii de kV și practic sînt limitate prin rezervele izolației liniilor și prin rezervele izolației externe a stațiilor. Din încercări incomplete rezultă că nivelul de izolație la impuls a unei linii de 110 kV din țara noastră (pe stîlp de beton sau de oțel) este de circa 800—900 kV (problema este în studiu la Institutul de energetică al Academiei).

Mai puțin periculoase, dar mult mai frecvente sînt acele supratensiuni externe care se datoresc unor lovituri de trăznet în apropierea liniei aeriene sau a stației electrice (supratensiuni induse). Mărimea acestor supratensiuni este de 80 ÷ 200 kV în cazul unui trăznet îndepărtat și de 300 ÷ 500 kV în cazul unui trăznet apropiat de linia aeriană [17]. Este interesant de remarcat că valoarea acestor supratensiuni (directe, induse sau datorită amorsării inverse) nu este proporțională cu tensiunea nominală a rețelei; astfel de tensiuni pot să ia naștere (în funcție de rezervele de izolație, valorile capacităților față de pămînt și față de conductorul de protecție în cazul unei rețele concrete) în rețele de tensiuni nominale diferite.

Echipamentul electric al stațiilor electrice (în special al stațiilor de 110 kV) nu este solicitat de supratensiunile produse de loviturile directe ale trăznetului datorită paratrăznetelor montate în orice stație pentru protecția barelor și echipamentului racordat la aceste bare. Pentru izolația echipamentului stației de 110 kV nu reprezintă pericol nici căderea de tensiune pe circuitul de pămîntare al paratrăznetului, respectiv amorsarea inversă, datorită scurgerii la pămînt a curentului de trăznet printr-o rezistență de pămîntare prea mare (face excepție de la această afirmație izolația bobinajelor de medie și joasă tensiune a unui transformator cu trei înfășurări).

Pericolul principal pentru izolația echipamentului stațiilor și substațiilor de 110 kV (transformator de putere, transformator de măsură, întreruptor și separator) este reprezentat de undele de supratensiuni atmosferice care sosesc dinspre linia aeriană. Descărcătorul micșorează la valoarea dorită unda incidentă, dar dacă distanța dintre acesta și echipamentul protejat este apreciabilă (30 ÷ 100 m) atunci în regim tranzistoriu potențialul în diferitele puncte din stație poate să depășească potențialul de pe bornele descărcătorului, fenomen care poate să ducă la conturnarea izolației echipamentului din stație. Unda de impuls standardizată (1,2/50 μs) reprezintă în general o solicitare convențională, echivalentă, a izolației echipamentului de înaltă tensiune și nu pe cea reală. Calculul acestor solicitări pentru o schemă de substație dată, cu un echipament dat, este posibil dar extrem de laborios. În schimb, metoda modelării dezvoltată în primul rînd de autori sovietici (cele două școli MEI și LPI — din Moscova și Leningrad) dă rezultate rapide și suficient de exacte, arată

clar dacă o substaţie concretă este sau nu protejată printr-un descărcător concret, montat în schemă într-un punct bine definit. În figura 1 se arată schema staţiei de 110 kV de pe lîngă uzinele Electroputere Craiova, şi schema echivalentă folosită pentru modelare (în model distanţele se modelează prin circuite elementare LC, caracteristica volt-secundă a izolaţiei şi a descărcătoarelor prin simulatoare electronice etc).

— *Supratensiunile interne*, se datoresc unor modificări interne bruşte ale parametrilor sistemului energetic (manevre voite, sau automate, avarii, fenomene de rezonanţă). Aceste supratensiuni se deosebesc între ele prim mărimea, panta de creştere sau durata lor diferită. Aceste caracteristici depind în mare măsură de felul în care este tratat punctul neutru al sistemului (neutru izolat, neutru pus la pămînt prin bobine de stingere sau neutru, pus direct la pămînt) şi de durata regimului de avarie.

Într-un sistem de neutrul izolat sau pus la pămînt printr-o bobină de stingere (Petersen) de exemplu, prin punerea la pămînt a unei faze, potenţialul celorlalte faze creşte de la tensiunea de fază pînă la tensiunea de linie şi se menţine timp lung. Înseamnă că izolaţia echipamentului de 110 kV, care în mod normal este solicitată la 64 kV trebuie să suporte într-un caz defavorabil lung timp 123 kV de frecvenţă industrială (tensiune practic dublă), fără a lua în considerare supratensiunea care apare la bornele întreruptorului la o manevră automată în acel moment. Tocmai din acest motiv şi din alte motive (vezi rezultatele experienţelor efectuate în laborator uzinal), dezlegarea punctelor de neutru al transformatoarelor şi introducerea unor bobine de stingere în reţelele noastre de 110 kV ar fi dezavantajoasă, poate imposibilă, pentru izolaţia echipamentului fabricat în ţară.

La sistemele cu neutrul pus direct sau prin intermediul unei impedanţe mici la masă se deosebesc din punct de vedere al creşterilor de tensiune, sisteme cu neutrul efectiv pus la pămînt şi sisteme care nu pot fi considerate puse efectiv la pămînt (în funcţie de raportul între reactanta şi rezistenţa homopolară şi reactanta componentei directe a circuitului format prin avarie). În cazul sistemului energetic în care neutrul poate să fie considerat efectiv pus la pămînt (cazul sistemului energetic al R.P.R.) tensiunea fazelor sănătoase prin atingerea unei faze de pămînt nu depăşeşte 80% şi într-un caz poate să fie chiar mai mică de 75% din tensiunea de linie; creşterea tensiunii de frecvenţă industrială este de la 64 la 100 sau 93 kV (în cazul cel mai defavorabil) avînd o durată extrem de mică (în cazul echipamentului de 110 kV este de ordinul zecimilor de secundă).

Datorită fenomenelor oscilante, valorile maxime ale supratensiunilor interne sînt mai mari decît acelea care rezultă din creşterile de tensiune indicate mai sus. Izolaţia principală a echipamentului — izolaţia părţilor puse sub tensiune faţă de masă, pusă la pămînt (care joacă rolul principal în coordonarea izolaţiei) este solicitată scurt timp ($20 \div 5\,000$ μs) la valori mult mai înalte.

Tot mai multe cercetări experimentale din ultimul timp însă dovedesc, că aceste vîrfuri de supratensiuni se datoresc în mare măsură tipu-

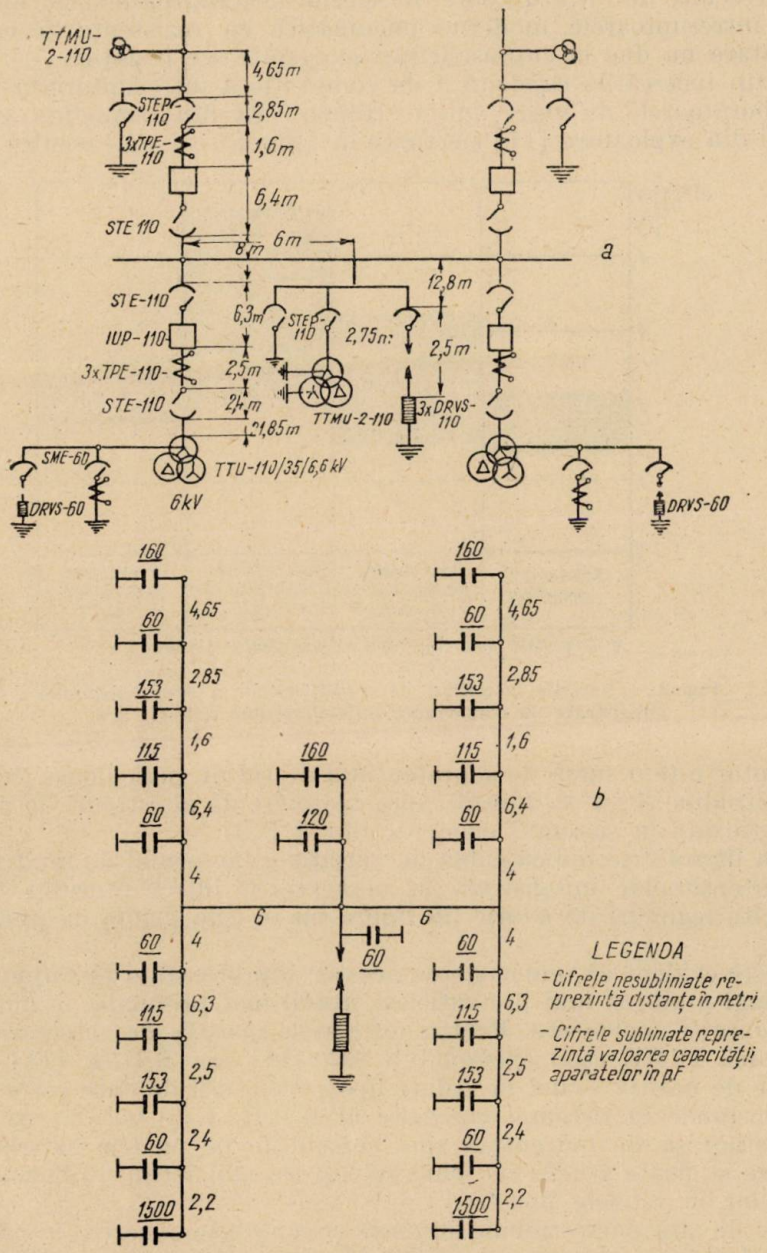


Fig. 1. — Schema stației de 110 kV de pe lîngă uzinele Electroputere — Craiova și schema echivalentă folosită pentru modelare.

rilor învechite de întreruptoare (în special întreruptoarelor cu ulei puţin) şi că întreruptoarele moderne pneumatice cu rezistenţe şi capacităţi de şuntare nu duc la suprasolicitări exagerate ale izolaţiei.

Din încercările capacităţii de comutaţie a întreruptorului IUP-110 din laboratoarele de mare putere (filiala VEI din Leningrad şi Bechovice) şi din exploatare [11] efectuate în ultimii 6—7 ani, rezultă că acest

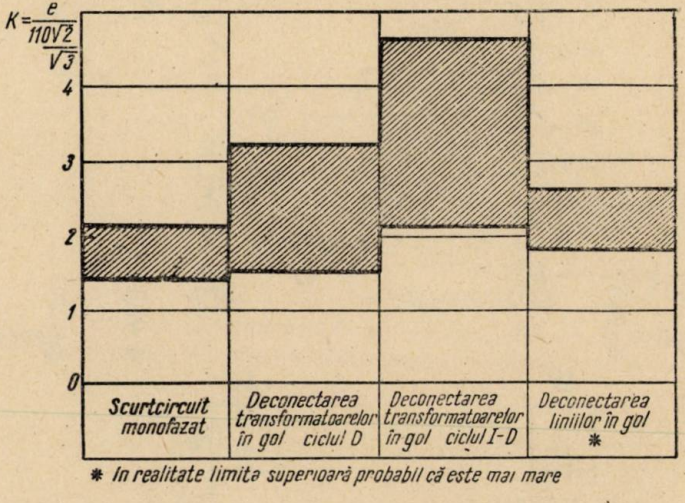


Fig. 2. — Variaţia factorului de multiplicitate a supratensiunilor înregistrate la manevrarea întreruptorului IUP-110 kV.

întreruptor este o sursă de supratensiuni destul de periculoase (în special ca amplitudine şi nu ca durată), spre deosebire de alte tipuri de întreruptoare utilizate în sistemul energetic din R.P.R.

În figura 2 se indică gama de variaţie a factorului de multiplicitate a supratensiunilor înregistrate la manevrarea întreruptorului IUP-110 în diferite regimuri de avarie (în figură nu se ţine seama de puncte singulare).

Este evident că, cunoaşterea acestor supratensiuni presupune experienţe mai multe şi mai pretenţioase, studii mai profunde pe modele, în laboratoare şi exploatare. Pentru institutele noastre de cercetare (IE al Academiei, IRME etc.) exemplul R.S.C. [11] sau R.D.G. [18] este cît se poate de pozitiv avînd în vedere lipsa unor serii de date certe privind supratensiunile în sistemul energetic al R.P.R. Este necesar ca atenţia specialiştilor să fie îndreptată spre cercetările pe modele experimentale prin care se poate studia cel mai rapid şi cel mai ieftin problema supratensiunilor în reţelele noastre.

Pe de altă parte trebuie studiate şi condiţiile concrete în care echipamentul electric al staţiilor de 110 kV este supus acestor solicitări. Se cunoaşte că la staţiile şi substaţiile din ţara noastră pentru clasa de izolaţie 110 kV se utilizează numai echipament electric de exterior. Spre deosebire de instalaţiile de interior, în aceste condiţii izolaţia echipamen-

tului electric este supusă solicitării supratensiunilor sub acțiunea simultană a ploii, zăpezii, poleiului, depunerilor de impurități solide și lichide etc. Vîntul poate să creeze concomitent presiuni mari asupra coloanelor de izolatoare, ceea ce reprezintă o sarcină mecanică (dinamică) considerabilă în special în caz de viscol (în anul 1953 viteza vîntului a atins în țară valoarea de circa 20—25 m/s).

De exemplu, după un calcul sumar, se poate arăta că efortul unitar normal care solicita porțelanul în partea inferioară a izolatorului suport al întreruptorului IUP-110 în cazul unui vînt cu o viteză de 25 m/s și a unei forțe portante la borne de 100 kgf, atinge valoarea de 30 kgf/cm^2 (de patru ori mai mic decît efortul unitar de rupere la încovoiere).

O dată cu creșterea curenților de scurtcircuit în rețele crește în importanță, rolul eforturilor electrodinamice care de asemenea dau naștere la solicitări mecanice (dinamice) apreciabile în izolație.

Temperaturile ridicate și în special cele rapid variabile creează tensiuni interne în izolatorii armați (datorită coeficienților de dilatare termică diferiți ai materialelor îmbinate). Aceste condiții însă în cazul rețelelor noastre nu duc la o creștere substanțială a eforturilor mecanice în izolație deoarece puterea de scurtcircuit este încă relativ mică și variațiile de temperatură în condițiile climei din țara noastră sînt relativ mici.

Impuritățile cuprinse în aer (aerosoli) și depunerile de murdărie pot să reducă considerabil valoarea tensiunilor de descărcare la izolația externă a echipamentului electric (în special în regiunile petrolifere și carbonifere ale țării). Este regretabil că nici în acest domeniu nu există la noi în țară date certe, publicate în urma unor observații nemijlocite. Nu s-a studiat nici influența negativă a acestor depuneri asupra nivelului de izolație a echipamentului electric al substațiilor din aceste regiuni. Presiunea atmosferică scăzută din regiunile muntoase ale țării sau călduri excesive, duc în mod inevitabil la același efect ca și depunerile de murdărie sau aerosolii, adică reducerea tensiunii de ținere a echipamentului electric aflat la o înălțime mai mare de 1 000 m și o temperatură a mediului ambiant mai mare de 35°C. În anumite condiții (construcții izolante pe bază de ulei și hîrtie — neetanșe) presiunea atmosferică scăzută și umiditatea aerului ridicată pot să ducă la reducerea nivelului de ținere a izolației interne (ca în cazul întreruptorului IUP-110).

2. NIVELELE DE IZOLAȚIE ȘI DE PROTECȚIE RECOMANDATE DE NORME STRĂINE PENTRU ECHIPAMENTUL DE 110 kV. COORDONAREA IZOLAȚIEI

Nivelele de izolație standard la echipamentul stațiilor exterioare de 110 kV, legate de linia aeriană sînt determinate (cel puțin în stadiul actual) în primul rînd de supratensiunile atmosferice și nu de supratensiuni interne; acestea se stabilesc în funcție de dispozitivele și metodele de protecție aplicate.

Eclatorii de coordonare a izolației (coarnele de protecție) aplicate pe transformatoare de putere și măsură (fabricate la uzinele Electroputere) reprezintă protecția cea mai simplă și cea mai ieftină avînd însă următoarele dezavantaje mai esențiale:

a) după amorsare și canalizare la pămînt a curentului de trăznet linia trebuie să fie deconectată pentru stingerea curentului de însoțire care duce la întreruperi în alimentarea cu energie a receptoarelor;

b) avînd un timp mare de întîrziere, coarnele de protecție nu protejează echipamentul stației de unde scurte de supratensiune;

c) avînd o dispersie mare la amorsare (în funcție de polaritatea undei, de timp etc.) coarnele de protecție nu pot să asigure o gradare a izolației în substație și o corelare rațională a izolației externe și interne a echipamentului. Din aceste motive autorii consideră că trebuie renunțat la coordonarea izolației echipamentului stației pe baza acestor coarne de protecție (montați de uzină la cererea exploatării) demontîndu-le.

— Descărcătoarele tubulare cu fibră sau viniplast (BTF sau DTV) față de coarnele de protecție au avantajul că acestea sting într-un domeniu relativ larg curenții de însoțire de frecvență industrială (descărcătoarele tubulare de 110 kV, fabricate de UEPC sting curenții de însoțire în limitele 0,4 ÷ 10 kA).

Dezavantajul principal al descărcătoarelor tubulare constă în faptul că acestea nu reprezintă o protecție sigură pentru izolația transformatoarelor de putere și de tensiune (panta mare de tăiere creează gradienți periculoși pentru izolația longitudinală a înfășurărilor).

— Descărcătoarele tip ventil cu rezistențe neliniare sînt aparate ideale pentru protecția echipamentului stațiilor electrice, tensiunea lor reziduală trebuie să stea la baza coordonării izolației și în sistemele energetice ale R.P.R. De exemplu după metodologia engleză nivelul de protecție U_p se alege în funcție de această caracteristică principală a descărcătorului după relația (1) conform [1]

$$U_p = 1{,}15\,U_{r5} + 30. \qquad (1)$$

Tensiunea reziduală U_{r5} se raportează la un curent de trăznet de 5 kA avînd forma undei de 8/20 μs. Nivelul de protecție determinat după (1) creează rezerve prea mari pentru eventuale unde cu front mult mai abrupt decît cel normalizat, pentru curenți de trăznet mai mari în amplitudine de 5 kA etc. Statisticile indică însă [1] că probabilitatea unui curent de trăznet care trece prin DRV, de 10 kA este de 1% din toate cazurile (adică o singură lovitură de trăznet în 58 de ani într-o regiune expusă 30 zile/an la descărcări atmosferice).

Folosind un *descărcător de 80%* pentru protecția echipamentului stațiilor noastre de 110 kV, avînd în vedere caracteristicile descărcătoarelor DRV și DRVS, fabricate de UEPC, din (1) rezultă un nivel de protecție egal cu 420 kV. Soluția este mult prea acoperitoare. Conform acestei metode (metodă practicată pînă nu de mult timp de aproape toate țările Europei occidentale și S.U.A.), pentru ca acest descărcător să nu producă deranjamente prin funcționarea lui în substația de 110 kV pe care o protejează conform [20] trebuie să fie îndeplinită și următoarea condiție:

$$U_p \geqslant (2{,}9 \div 3{,}7)\,U_{max} = (2{,}9 \div 3{,}7)\,123 = 356 \div 455 \text{ kV}. \qquad (2)$$

În relația (2) valorile mici se referă la rețele cu neutrul legat efectiv la pămînt (cazul tipic al stațiilor electrice de 110 kV din R.P.R.). Descăr-

cătoarele alese după acest criteriu nu trebuie să se amorseze sub acțiunea supratensiunilor interne.

După această metodă nivelul de ținere minim al izolației se alege cu circa 20 + 30% mai mare decît nivelul de protecție. Acest nivel de izolație este asigurat prin încercări la fabrica constructoare supunînd izolația echipamentului electric la două probe și anume:

proba la frecvență industrială cu tensiune aplicată (și indusă dacă este cazul) și

proba de impuls de tensiune cu unda standard (și cu unda tăiată dacă este cazul).

— Coordonarea nivelelor de izolație și de protecție după metoda sovietică se deosebește considerabil față de metodele practicate în Europa occidentală și S.U.A. După această metodă nivelul de protecție garantat la impuls, undă plină, se determină din relația

$$U_{gp} = 1{,}1\ U_{r5} + 15. \qquad (3)$$

Nivelul de protecție garantat la impuls, la unda tăiată de obicei este cu 20% mai ridicat față de valoarea obținută din relația (3). Dependența dintre nivelul de protecție la impuls și tensiunile de încercare ale echipamentului după această metodă în general se poate exprima prin relații de genul celor din tabela 1.

Tabela 1

Coordonarea nivelului de protecție cu nivelele de izolație după metoda sovietică

Izolație internă			Izolație externă
undă plină		undă tăiată	undă plină și undă tăiată
transformatoare și aparate pînă la 35 kV	transformatoare și aparate 110 și 220 kV		
$U_{inc.} = 1{,}15\ U_{gp}$	$U_{inc.} = 1{,}1\ U_{gp}$	$U_{inc.} = 1{,}15\ U_{gp}$	$U_{inc.} = \frac{U_{gp}}{0{,}84}$

Folosind descărcătoare cu rezistență variabilă fabricate la UEPC, din (3) rezultă un nivel de protecție garantat de 390 kV. Corelarea nivelelor de izolație și de protecție după normele străine [21] ... [25] cele mai recente și STAS este redată în tabelele 2,3 și 4.

În tabelele 5 și 6 sînt redate tensiunile de încercare de impuls și de frecvență industrială la care a fost supusă izolația echipamentului electric de înaltă tensiune de 110 kV, fabricat la UEPC, precum și tensiunile de încercare a unor separatoare străine de 110 kV (cu deosebit accent asupra izolației dintre contactele deschise).

Din analiza datelor rezultă, că cel mai scăzut nivel de protecție (330 kV) se admite în rețelele germane cu neutrul pus efectiv la pămînt și pentru aceleași rețele cifra impusă de proiect STAS este cea mai ridicată. Din punctul de vedere al nivelului de izolație la impuls noul GOST și VDE prevăd valori mai mici decît cele mai recente recomandări CEI. Încercarea de impuls cu undă tăiată este prevăzută explicit numai de

Tabela 2

Tensiunile de încercare recomandate de norme străine pentru aparate (întreruptor, separator, transformator de curent) de 110 kV

Nr. crt.	Norma, standard	Tens. maximă de regim a izol. în kV	Tensiunile de încercare în kV sau kV – max					
			frecvenţă industrială		impuls undă plină		impuls undă tăiată	
			A	*B*	*A*	*B*	*A*	*B*
1	CEI—Publicaţia 71/1960	123	230	185	550	450	—	—
2	GOST 1516—60	126	280_E	$\frac{250}{200^*}$	460_E	425_I	570_E	550_I
3	VDE 0111 a/58	125	262	210	505	430	—	—
4	BSS 116—52	121	240	195	550	450	—	—
5	ASA C—57—13—1948	115	230		550		630	
6	SEV 0183—56	123	230	185	550	450	—	—

OBS.: 1) *A* şi *B* reprezintă sisteme cu neutru nepus, respectiv pus efectiv la pământ;
2) *E* şi *I* reprezintă izolaţia externă şi internă a aparatelor indiferent de *A* şi *B*;
3) Semnul * indică tensiunea de încercare a aparatelor cu izolaţia internă în ulei la care izolaţia externă se încearcă separat.

Tabela 3

Tensiunile de încercare recomandate de norme străine pentru transformator de putere şi de tensiune 110 kV

Nr. crt.	Norma, standard	Tens. maximă de regim a izol. kV	Tensiunile de încercare în kV sau kV max					
			frecvenţă industrială		impuls undă plină		impuls undă tăiată	
			A	*B*	*A*	*B*	*A*	*B*
1	CEI—Publicaţia 71/1960	123	230	185	550	450	—	—
2	GOST 1516—60	126	280_E	200_I	460_E	480_I	570_E	550_I
3	VDE 0532/1.59	125	220	175	525	450	630	520
4	BSS 171—59	123	230	185	550	450	(1—1,15) × 550	(1—1,15) × 550
5	ASA C—57—13—1948		230		550		630	
6	ASA C—57—12—1958	115	230	185	550	450	630	520

Tabela 4

Nivele de protecţie recomandate de norme străine pentru reţele de 110 kV

Nr. crt.	Norma, standard	Tensiunea maximă de regim a reţelei kV	Valoarea maximă a tensiunii de impuls a nivelului de protecţie în kV max	
			caz *A*	caz *B*
1	CEI Publicaţia 99/1958	123	443	350
2	SEV 0183—56	123	410	355
3	VDE 0111 a/4.58	125	415	330
4	Proiect STAS	123	—	370

Tabela 5

Tensiunile (în kV sau kV max) la care se încearcă izolația dintre contactele deschise la cîteva construcții de separatoare de 110 kV

Nr. crt.	Tipul separatorului, firma și țara	Izolația față de masă		Izolația dintre contacte deschise	
		50 Hz	impuls undă plină	50 Hz	impuls undă plină
1	OVN 110 Z, Skoda, R.S.C.	230	550	280	600
2	SHF 110, TRO, R.D.G.	383	630	383	630
3	RON 110, U.R.S.S.	250	460	355	570
4	STE 110, UEPC, R.P.R.	260	550	345	550

Tabela 6

Tensiunile de încercare ale echipamentului de 110 kV fabricat de UEPC pînă în prezent (în kV și kV max)

Nr. crt.	Denumirea produsului	Frecvență industrială			Impuls		
		față de pămînt	între contacte deschise	între faze	față de pămînt	între contacte deschise	între faze
1	Separator STE, STEP—110	260	345	260	550	550	550
2	Întreruptor IUP-110	260	260	260	550	550	550
3	Transformator de curent TPE-110	260	—	—	550	—	—
4	Transf. tens. TTMU2—110	230	—	—	450	—	—
5	Transf. de putere TTU—110	190	—	—	450	—	—

standardul sovietic și cel american (standardul britanic de transformatoare BSS 171—59 de asemenea a introdus ca obligatorie această încercare, dar admite să se efectueze la aceleași valori ca la încercarea cu undă plină).

GOST-ul face deosebire între izolația externă și internă a echipamentului iar celelalte standarde țin cont numai de felul tratării neutrului. La separatorul german de 110 kV izolația dintre contactele deschise se încearcă la aceeași tensiune ca și izolația față de masă spre deosebire de separatoare cehoslovace, sovietice sau românești.

Din tabele și din analiza detaliată a standardelor se vede că recomandările CEI în domeniul coordonării izolației cuprind indicații generale care se află în afara discuțiilor dintre specialiști. În recomandările CEI nu sînt cuprinse tensiuni de încercare cu unda de impuls tăiată, nu se face deosebire dintre izolația diferitelor aparate, nu se face distincție între tensiunea de ținere a izolației externe și a celei interne etc.

Recomandările CEI — Publicația 71 nu dau posibilitatea încercării comode a izolației echipamentului de exterior la tensiunea de frecvență industrială în stare uscată (tensiunile de încercare CEI de frecvență industrială se referă la încercarea obligatorie sub ploaie artificială, a echipamentului electric de exterior). Încercările echipamentului de exterior în

stare uscată efectuate în laboratoare diferite duc mai sigur la rezultate echivalente, pe cînd cele sub ploaie artificială (realizată chiar după norme) diferă de la caz la caz nemaiținînd seama şi de problema echivalenței dintre ploaia artificială şi cea naturală.

Nu se specifică tensiunile de încercare a izolației dintre contactele deschise ale separatorului etc. Este adevărat că în ultimul timp recomandările CEI sînt în permanență modificate dar după părerea autorilor este nevoie ca, axat pe indicațiile generale ale CEI să se elaboreze un STAS sau instrucțiuni speciale, cu indicații concrete, detaliate, privind coordonarea izolației, nivelele de izolație şi protecție din sistemele energetice ale R.P.R. după modelul altor standarde naționale (de ex. GOST, VDE, ASA etc.) sau prescripțiuni tehnice de genul celor sovietice (PY) privind protecția instalațiilor electrice contra supratensiunilor, apărute cel mai recent.

3. GRADAREA IZOLAȚIEI ÎN STAȚII

La proiectarea diferitelor aparate, se ține cont de obicei de un deranjament în sistemul de protecție al stației. Acest deranjament poate să provină de la descărcător (degradarea discurilor etc.) sau să aibă o altă cauză (curentul de trăznet depăşeşte *cadrul* normalizat, frontul, respectiv panta de creştere, amplitudinea tensiunii reziduale sînt diferite față de cele luate prealabil în considerare etc.). În orice caz este bine şi rațional să se țină cont şi de o descărcare nedorită, de acest gen, atît la un aparat luat separat (coordonarea internă a izolației) cît şi la complexul de aparate din substație (coordonarea externă a izolației).

Analizînd izolația unui aparat, de exemplu izolația întreruptorului de 110 kV, rezultă că numai următoarea gradare a izolației poate să fie rațională: locul cel mai slab în izolația întreruptorului trebuie să fie izolația externă în aer, străpungerea căreia nu aduce pagube însemnate, străpungerea la masă este mai puțin periculoasă decît străpungerea dintre faze vecine, sau contacte deschise, străpungerea izolației solide este mai periculoasă decît străpungerea izolației lichide (ulei), iar străpungerea acestuia din urmă este mai neplăcută decît străpungerea unor distanțe izolante în aer etc.

În mod analog aparatele (întreruptor, separator, transformator etc.) care formează complexul de echipament electric al stației este rațional să aibă nivele de izolație diferențiate, în special la stații şi substații mai importante de 110 kV (şi la tensiuni nominale superioare acestuia).

În privința gradării nivelelor de izolație ale echipamentului stației există mai multe ipoteze.

După o ipoteză, transformatorul de putere fiind cel mai scump obiect din stație, avarierea căruia ar aduce pagube materiale maxime, nivelul de izolație al acestuia trebuie să fie cel mai ridicat față de restul echipamentului.

După cea de-a doua ipoteză (care este de altfel şi părerea autorilor) nivelul de izolație al întreruptoarelor trebuie să fie cel mai ridicat, iar

nivelul de izolație al transformatorului să fie cel mai scăzut, din următoarele motive : la o stație mai importantă cu mai multe sosiri și plecări, avarierea (în cazuri extrem de rare) unui transformator aduce după sine deconectarea unui singur fider, în schimb avarierea unui întreruptor poate să paralizeze funcționarea unei stații întregi [1], [2], [17]. Pe de altă parte asigurarea unui nivel de izolație mai ridicat la un intreruptor este ușor realizabilă din punct de vedere tehnic, iar economic nu reprezintă vreo suplimentare esențială a prețului de cost.

În schimb la un transformator o reducere relativ mică a nivelului de izolație aduce după sine reducerea considerabilă a prețului de cost, a gabaritului și greutății. Ambele ipoteze se bazează pe principiul gradării izolației, pe care o fac însă, din considerente tehnico-economice diferite, pe căi diferite.

După cea de a treia ipoteză, însușită practic de recomandările CEI, nu este nevoie de gradarea izolației echipamentului substației și se impune un nivel de izolație indiferent dacă este vorba de transformator, întreruptor sau alt aparat din substație, tensiunile de încercare ale acestora depinzînd numai de modul de tratare a neutrului sistemului energetic luat în considerație (pus sau nepus efectiv la pămînt).

4. SITUAȚIA ÎN SISTEMUL ENERGETIC AL R.P.R.

După părerea autorilor, în sistemul energetic din R.P.R. numărul declanșărilor liniilor datorite descărcărilor atmosferice ar putea fi redus printr-o mai rațională folosire a mijloacelor de protecție contra supratensiunilor (conductorul de protecție, descărcătoare etc.).

Descărcătoarele cu rezistență variabilă, elaborate de ICET și fabricate în prezent la UEPC, după performanțele tehnice pe care le posedă (vezi tabela 7) ar fi aparate corespunzătoare pentru o coordonare rațională a izolației stațiilor de 110 kV, dar cu toate acestea din lipsa unor scheme eficiente de protecție, acestea nu au dat încă efectul dorit.

Tabela 7

Performanțele descărcătoarelor tip DRV și DRVS (actuale și cele propuse)

Nr. crt.	Denumirea caracteristicilor	performanțe	
		actuale	propuse
1	Tensiunea nominală a rețelei în kV	110	110
2	Tensiunea maximă a descărcătorului în kV	100	30
3	Frecvența nominală Hz	50	50
4	Curentul de descărcare nominal 8/20 μs kA	5	5 (10)
5	Tensiunea reziduală pentru 5 kA (max) în kV	340	310 (340)
6	Tensiunea de amorsare la impuls 1/50 μs (min) kV	340	310 (340)

Este de remarcat faptul că în genere nu a fost înregistrată funcționarea contoarelor montate pe aceste aparate. Acest fapt permite să se presupună că nivelul undelor incidente de supratensiuni externe și a celor interne este sub nivelul tensiunilor de amorsare a descărcătoarelor

DRV şi DRVS şi prin urmare nu reprezintă un pericol real pentru izolaţia staţiei. Numărul mare de descărcătoare se montează de regulă la staţii cu un număr mare de linii (de ex. la staţia Doiceşti), adică acolo unde supratensiunile sînt mai puţin periculoase (datorită capacităţilor mari la pămînt şi a liniilor care micşorează impedanţa echivalentă).

De regulă nu se practică metoda conectării descărcătoarelor direct la bornele transformatoarelor. Uneori descărcătoarele de tip ventil se montează la intrarea în staţie şi nu la bare. Majoritatea echipamentului electric de 110 kV (transformator de putere, de tensiune şi de curent) la insistenţa exploatării este livrată şi montată cu eclatori de coordonarea izolaţiei (coarne de protecţie) care nu mai sînt necesare, ducînd la distrugerea izolaţiei (cazul funcţionării coarnelor de protecţie de pe transformatorul de 20 MVA de la Floreşti). Descărcătoarele tubulare (tip DTF sau DTV) au spaţiile disruptive exterioare diferite. Nu peste tot rezistenţele de punere la pămînt se fac, se cunosc şi se controlează periodic conform instrucţiunilor.

În profilactica izolaţiei mai sînt multe procedee de perfecţionat şi de completat. Sînt necesare studii teoretice de genul celor din lucrarea [26] şi este necesar să se elaboreze după standard [27], norme sau prescripţii practice pentru coordonarea raţională a izolaţiei şi pentru reglementarea protecţiei contra supratensiunilor în sistemul energetic al R.P.R., valabile atît pentru proiectarea cît şi exploatarea staţiilor.

5. POSIBILITĂŢILE REDUCERII NIVELULUI DE IZOLAŢIE ÎN SISTEMUL ENERGETIC AL R.P.R.

Reducerea nivelelor de izolaţie a devenit în ultimii cîţiva ani cea mai importantă problemă în domeniul coordonării izolaţiei. Nu întîmplător principala atenţie a specialiştilor din diferite ţări este orientată spre următoarele direcţii strîns legate de problema reducerii nivelelor de izolaţie :

a) stabilirea formei şi amplitudinii undei de supratensiune internă care este cea mai tipică solicitare de acest gen în exploatare ;

b) determinarea rigidităţii dielectrice a izolaţiei echipamentului electric de înaltă tensiune la astfel de solicitări de scurtă durată ;

c) precizarea condiţiilor tehnice impuse descărcătoarelor cu rezistenţe neliniare folosite pentru limitarea supratensiunilor interne în staţii ;

d) introducerea de restricţii pentru operaţiile de comutare din sistemul electroenergetic pentru evitarea unor cazuri care cu siguranţă duc la supratensiuni interne exagerate ;

e) elaborarea unor reguli pentru proiectarea sistemelor bine protejate atît contra supratensiunilor de origine internă cît şi externă, exagerate ;

f) stabilirea unor tensiuni de încercare la impuls şi la frecvenţă industrială echivalente cu solicitările din exploatare (în primul rînd supratensiuni interne) etc.

Clasificarea parţială a problemelor menţionate mai sus a dus la realizarea primelor aparate, transformatoare şi reţele cu izolaţie redusă

și la acumularea unei experiențe valoroase de exploatare cu privire la comportarea acestui echipament [3], [5], [6]. Este caracteristic faptul că peste această problemă nu trec cu vederea nici cele mai recente recomandări ale CEI cu toate că deocamdată nu le acceptă, recomandîndu-le pentru studiu. În tabela 8 sînt redate aceste valori și sînt extrapolate liniar tensiunile de ținere care ar corespunde în acest sistem de coordonate echipamentului stațiilor noastre de 110 kV, față de prevederile proiectului de STAS (nivele de izolație și protecție). În tabela 8 tensiunile de ținere la impuls și la frecvență industrială după prevederile proiectului STAS [27] sînt indicate în paranteză. Efectul economic al unei astfel de reduceri este substanțial în primul rînd la transformatoare de putere dar este de luat în considerare și la alte aparate din stație.

Tabela 8

Tensiuni de ținere al echipamentului electric în sistemul AGEK cu izolație redusă

Tensiune maximă de regim a izolației	Tensiune de ținere la frecvență industrială în condiții standardizate	Tensiune de ținere la impuls undă plină standardizată negativă
123	150 * (185)	360 * (450)
145	185 (230)	450 (550)
170	230 (275)	550 (650)
245	325 (395 și 360)	750 (900 și 825)
300	395 (510 și 460)	900 (1 175 și 1050)
420	570 (680 și 630)	1 300 (1 550 și 1425)

* Valori obținute prin extrapolare liniară.

Rezervele interne ale sistemului energetic și ale izolației echipamentului electric de înaltă tensiune care au creat posibilitatea reducerii nivelelor de izolație în general și la clasa de 110 kV în special constau în următoarele :

a) Descărcătoarele cu rezistențe neliniare, chiar de tipul actual (DRV și DRVS) destinate pentru protecția contra supratensiunilor externe (atmosferice) au în general suficientă capacitate de trecere (capacitate termică) pentru protejarea izolației contra supratensiunilor interne de scurtă durată ivite la deconectarea transformatoarelor în gol [4], limitînd considerabil valoarea supratensiunilor interne [6].

În general, durata convențională de trecere a curentului de însoțire de frecvență industrială este foarte mică (în S.U.A. se socotește de 0,002 s).

Folosirea descărcătoarelor speciale (ca număr de discuri și eclatoare unitare de amorsare) conectate în paralel s-ar putea să rezolve problema reducerii mai departe a nivelelor de izolație în perioade de tranziție de la descărcătoarele actuale la noua serie de descărcătoare cu tensiune reziduală scăzută și capacitate termică ridicată.

Pe de altă parte exemplul altor țări [4], [13] arată că elaborarea unor descărcătoare tip ventil care să limiteze și supratensiunile interne

este perfect posibilă. (Este vorba de descărcătoare cu stingere magnetică și descărcătoare cu „tervit" care ar putea să fie elaborate de către ICET).

b) Întreruptorul joacă un rol determinant în stabilirea nivelului supratensiunilor interne într-un sistem [4]. Noile întreruptoare cu rezistențe liniare de șuntare și înseriere și în special cu cele neliniare creează posibilități pentru reducerea și mai esențială a nivelelor de izolație.

Actualul tip de întreruptor IUP-110 pe lîngă că nu are putere de rupere suficientă și prin aceasta nu creează posibilități pentru o tratare corespunzătoare a neutrului (legarea metalică directă a tuturor punctelor de neutru la pămînt) care să ducă la coborîrea nivelului supratensiunilor interne, este un izvor de supratensiuni exagerate la deconectarea transformatoarelor și liniilor în gol. Din acest motiv și din alte motive serioase (obținerea unui întreruptor modern care să satisfacă nevoile sistemului nostru energetic în plină dezvoltare), se consideră că asimilarea în fabricație a unor întreruptoare moderne pneumatice cu rezistențe de șuntare—înseriere, este una din cele mai importante probleme a industriei electrotehnice.

c) În sistemul energetic se pot lua măsuri multe pentru crearea unor condiții favorabile reducerii nivelului de izolație. Astfel regimul de tratare al neutrului poate să fie revizuit avînd în vedere puterile de scurtcircuit relativ mici din sistemul energetic al R.P.R. (calculele sînt făcute cu multă acoperire). Coeficientul de punere la pămînt poate fi îmbunătățit și pot fi create condiții pentru utilizarea descărcătoarelor de 70—75%. Schema de conectare a descărcătorului poate fi îmbunătățită prin apropierea acestuia de obiectul protejat (conectarea descărcătorului direct la bornele transformatorului). Valoarea rezistențelor de punere la pămînt și a conturului de pămîntare poate să fie asigurată prin instrucțiuni speciale și profilactică corespunzătoare.

d) Supratensiunile mari (cu un factor de multiplicitate $k \geqslant 2{,}9$) sînt extrem de rare și numărul de funcționare al descărcătoarelor este extrem de mic [4] ușor suportabil. Supratensiunile prelungite care au loc la linii foarte lungi, de tensiuni foarte înalte (rețele 380—500 kV, cu neutrul pus direct la pămînt) nu sînt specifice sistemelor energetice din R.P.R. Pe de altă parte supratensiunile de această natură pot fi evitate printr-o secvență logică a conectărilor și deconectărilor diferitelor porțiuni sau diferitelor faze din rețea [4]. În ceea ce privește undele de supratensiuni externe și interne într-o măsură mai mică la stații mari, unde intrarea este protejată conform normelor, unda incidentă se deformează și se atenuează într-atît încît din acest punct de vedere reducerea nivelului de izolație este posibilă [6], [26].

e) În echivalarea solicitărilor izolației din exploatare și de la platforma de încercare, în general s-au utilizat coeficienți de siguranță prea mari. Cercetarea formei și amplitudinii undei de supratensiune internă și a echivalenței ei cu tensiunile de încercare de la standul de probă este o sursă care poate să ducă la micșorarea nivelelor de izolație.

Concluzie. Prin măsurările și în condițiile specificate mai sus nivelul de izolație al echipamentului stațiilor de 110 kV poate să fie scăzut sensibil chiar în următorii ani. În primă instanță s-ar putea realiza un nivel de protecție de circa 310—330 kV (raportat la 5 kA).

Nivelul de izolație la impuls al transformatoarelor de putere și de tensiune în aceste condiții poate să fie redusă de la 450 kV la 380—400 kV. În schimb la întreruptorul, separatorul și transformatorul de curent de 110 kV nu este necesar să se reducă nivelul de izolație avînd în vedere motivele menționate mai sus. În mod corespunzător este posibil să se reducă tensiunea de încercare la frecvență industrială de la 185 kV la 165—175 kV. Bineînțeles că reducerea nivelului de izolație între faze vecine (distanța de izolație în special) nu trebuie să se facă în aceeași proporție ca reducerea nivelului de izolație față de pămînt și poate fi menținută la nivelul actual.

6. EXPERIENȚA DE EXPLOATARE A SISTEMELOR ENERGETICE STRĂINE CU IZOLAȚIE REDUSĂ

În multe țări reducerea nivelelor de izolație, respectiv folosirea unei rețele de o clasă inferioară la o clasă de izolație superioară, este o preocupare de mai mulți ani [2], [4], [5], [6]. Practica de exploatare a dovedit că este posibilă și o reducere a nivelului cu două clase de izolație (în înțelesul ASA). În cadrul acestei acțiuni la izolația transformatoarelor de putere clasa 138 kV s-a putut trece la o izolație dimensionată și încercată pentru clasa de 92 kV, coborînd tensiunea de încercare la impuls de la 650 kV la 450 kV.

În sistemul AGEK puterea totală a transformatoarelor de 138 kV avînd izolație redusă cu una sau două clase, în 1958 a atins 7 000 MVA și 22 de ani de exploatare fără nici o avarie din cauza izolației slăbite. Economiile obținute în urma reducerii au atins suma de 2,5 mil. dolari numai la costul lucrărilor de investiții. Începînd cu anul 1949 s-a trecut la nivele de

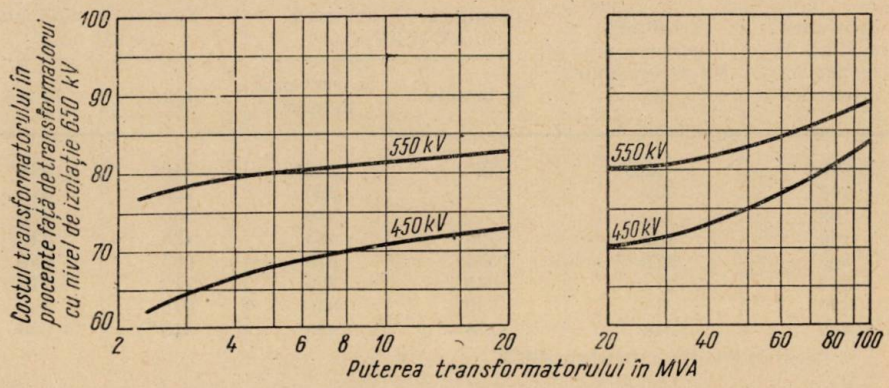


Fig. 3. — Eficiența economică a reducerii cu două clase a nivelului de izolație a transformatoarelor : *a* — transformatoare cu răcire naturală ; *b* — transformatoare cu circulația forțată a uleiului și a aerului.

izolație reduse cu două clase. Efectul economic al acestor măsuri a fost de asemenea considerabil precum este indicat în figura 3, în special datorită reducerii prețului de cost al transformatoarelor de putere.

Tensiunile de încercare ale transformatoarelor destinate rețelelor cu tensiunea nominală 115 şi 138 kV sînt redate în tabela 9.

Tabela 9

Tensiunile la care firma AGEK încearcă transformatoarele de putere

Tensiunea sistemului în kV		Tensiunea de încercare în kV resp. kV max		Clasa de izolatie a transf.	Tensiunea de încercare	
					Tensiunea maximă de regim	
nominală	maximă de regim	la frecvență industr.	la impuls		la frecvență industr.	la impuls
		230	550	115	1,91	4,55
115	121	185	450	92	1,54	3,70
		140	350	69	1,18	2,80
		275	650	138	1,90	4,50
138	145	230	550	115	1,59	3,80
		185	450	92	1,28	3,10

Este de remarcat faptul că această reducere a nivelelor de izolație se efectuează într-un sistem cu linii electrice de transport mult mai lungi ca în țara noastră.

Reducerea nivelelor de izolație în general se bazează pe utilizarea unor descărcătoare tip ventil, cu rezistențe din tirit şi cu stingere magnetică. Caracteristicile descărcătoarelor folosite în sistemul General Electric cu izolație redusă sînt redate în tabela 10.

Tabela 10

Performanțele descărcătoarelor tip ventil cu stingere magnetică

Tensiunea maximă de regim a rețelei kV	Tensiunea maximă a descărcătorului kV	Tensiunea de amorsare în kV şi kV max		Tensiunea reziduală în kV max	
		la impuls	la frecvență industr.	5 kA	10 kA
123*	92,0*	227*	248*	240*	268*
145	109	265	290	285	315
169	127	310	340	335	370
242	182	435	485	475	520
302	228	545	615	605	655
362	272	645	725	710	775
420	315	740	840	820	895
462	348	825	935	910	1 000

* Valori obținute prin extrapolare grafică.

7. STABILIREA NIVELULUI REAL DE IZOLAȚIE A ECHIPAMENTULUI FABRICAT DE UEPC PE CALE EXPERIMENTALĂ

În vederea obținerii de date experimentale care să stabilească nivelul real al izolației echipamentului fabricat de UEPC, s-a încercat următorul echipament electric: transformatorul de putere, întreruptorul cu ulei

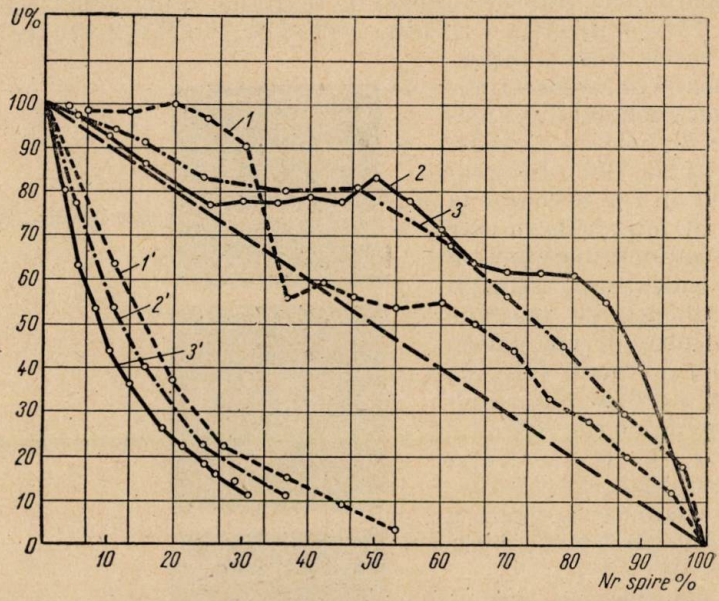


Fig. 4. — Repartiția potențialelor pe bobinajul de 110 kV la trei transformatoare diferite.

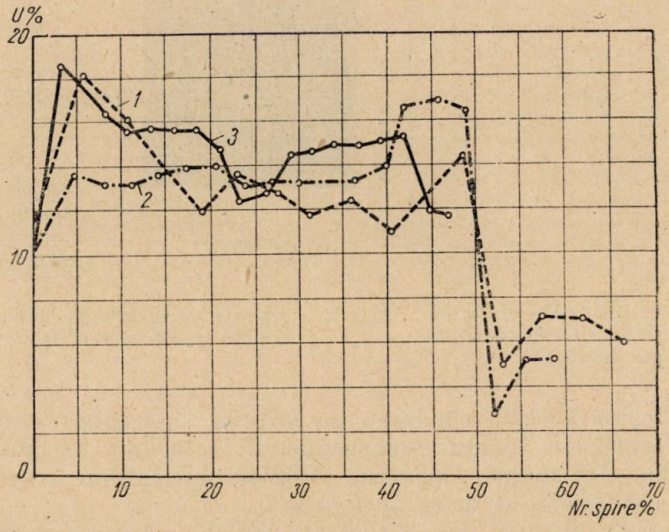


Fig. 5. — Repartiția gradienților pe bobinajul de 110 kV la trei transformatoare diferite.

puţin, separatorul, transformatorul de tensiune, transformatorul de curent (tipurile TTU-5-10/110; IUP-110; STE-110; TTMU-2-110 şi TPE-110).

1) Încercarea transformatoarelor de putere la impuls de tensiune s-a făcut după metodologia de încercare cunoscută [20], [28], [29]. În prealabil, studiul s-a executat la tensiune de impuls de valoare scăzută (gradientografie), la care s-au ridicat repartiţia iniţială, gradienţii de tensiune care apar între diverşi galeţi, potenţiale şi liniale [29]. În figurile 4, 5 şi 6 se dau rezultatele experimentale obţinute pe înfăşurările de 110 kV la trei transformatoare diferite. Pentru tensiunea de ţinere a izolaţiei s-au găsit valori între 510—560 kV [29].

În continuarea studiului, s-au executat defecte artificiale la circa 20 kV tensiunea de impuls, cu scopul cunoaşterii mai precise a naturii, ori locului eventualelor defecte care ar putea să apară la încercările de înaltă tensiune. Cîteva oscilograme corespunzătoare defectelor artificiale se arată în figura 7.

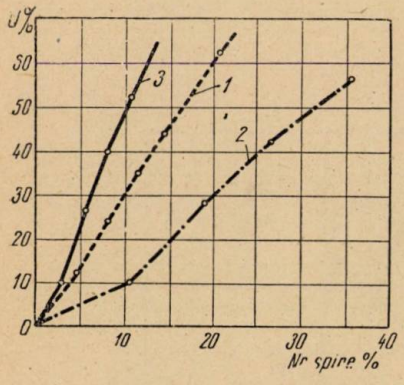


Fig. 6. — Repartiţia linialelor pe bobinajul de 110 kV la trei transformatoare diferite.

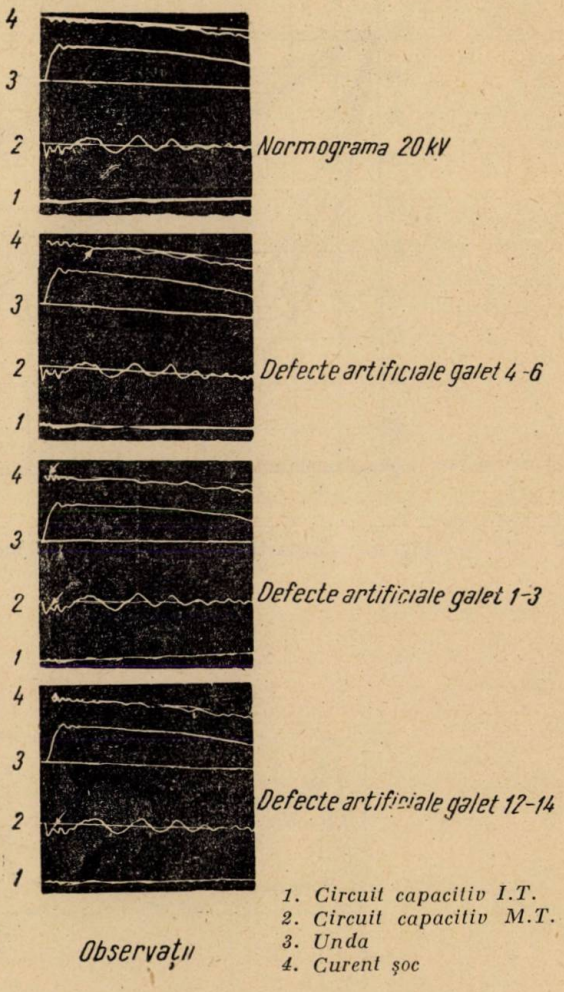


Fig. 7. — Defecte artificiale pe bobinajul de 110 kV al unui transformator de 10 MVA.

Încercările propriu-zise cu tensiune înaltă de impuls au fost executate după schema de încercare din figura 8, înregistrîndu-se pe oscilograme doi

curenți (curentul de șoc și curentul capacitiv), tensiunea de impuls aplicată, precum și oscilații de etalonare.

Oscilogramele rezultate din încercări și prezentate în figurile 9, 10 și 11, arată că nivelul de izolație real al transformatoarelor de putere de 110 kV

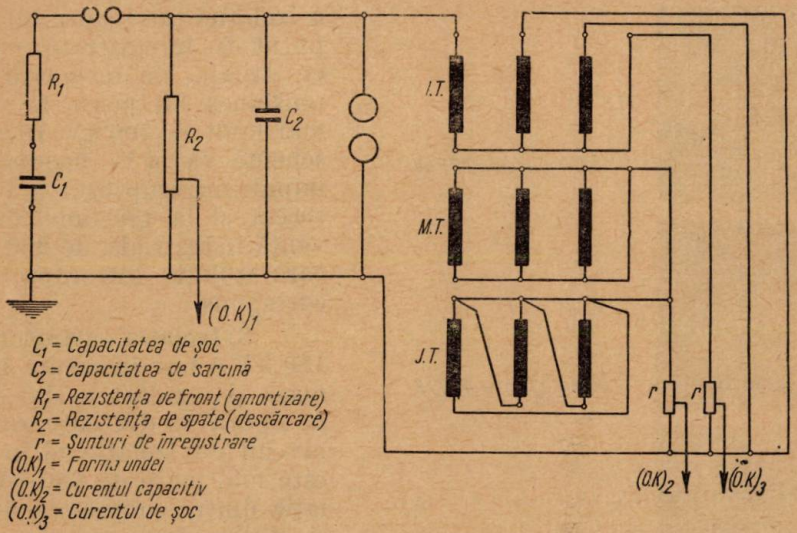


Fig. 8. — Schema de încercare a transformatorului de putere.

corespunde nivelului impus de CEI, respectiv 450 kV în cazul sistemelor cu neutrul legat efectiv la pământ.

În completarea studiului s-au efectuat încercări cu tensiune de frecvență industrială. Izolația transformatoarelor, încercată cu tensiunea de 150 Hz (față de masă) la 190 kV a rezistat fără străpungeri parțiale sau efluvii pronunțate.

2) Determinarea nivelului de izolație al întreruptorului cu ulei puțin s-a făcut în trei scheme de încercare.

În prima schemă, reprezentată în figura 12, se urmărește verificarea izolatorului suport și a tijei izolate în poziția închisă a întreruptorului. Pentru determinarea nivelului de izolație tensiunea de impuls a fost aplicată în trepte succesive de la 300 kV pînă la valoarea de 600 kV la care tija izolantă n-a rezistat, după cum rezultă din oscilogramele prezentate în figura 13. În acest caz limita de ținere se consideră 560 kV valoare la care izolația întreruptorului a suportat încercarea.

Schema a doua de încercare a întreruptorului fig. 14, urmărește verificarea acelorași elemente izolante ale întreruptorului, dar în poziția deschisă. Din seria de încercări efectuate se dau în figura 15, două oscilograme, prima la 300 kV iar a doua la 690 kV, tensiuni la care izolația întreruptorului a corespuns.

Încercările efectuate după cea de-a treia schemă (fig. 16) au drept scop verificarea izolației dintre contactele deschise ale întreruptorului

(izolaţia camerei de stingere). Ca şi în cazurile precedente tensiunea a fost aplicată în trepte succesive din care în figură 17 se dau oscilogramele pentru treapta de 300 kV şi 650 kV la care izolaţia dintre contacte a corespuns.

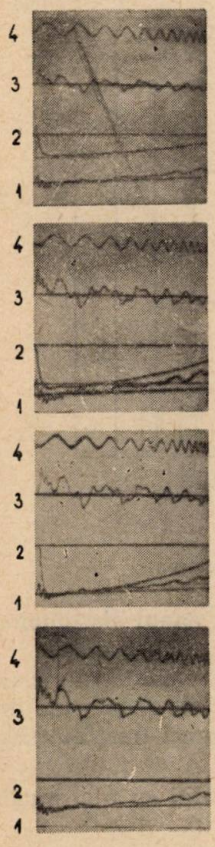


Fig. 9. — Încercarea de impuls a unui transformator de 10 MVA, 110 kV.

Caracteristica volt-secundă a izolaţiei întreruptorului nu a putut fi înregistrată deoarece cu utilajul de încercare actual tensiunea nu poate fi ridicată mai mult de 700 kV. În aceleaşi scheme ca şi în încercările de impuls întreruptorul a fost încercat şi la tensiune de frecvenţă industrială de 260 kV, la care izolaţia întreruptorului a corespuns.

3) Izolaţia separatorului de 110 kV a fost încercată faţă de masă şi rezultatele sînt arătate în figura 18 din care reiese că nivelul de izolaţie al acestuia este mai mare de 650 kV. Izolaţia dintre contactele deschise şi dintre faze vecine nu s-a putut străpunge la tensiunea maximă a staţiei (700 kV). Caracteristica volt-secundă a izolaţiei nu s-a putut ridica din aceleaşi motive. La încercările cu tensiune de frecvenţă industrială s-a determinat : tensiunea de conturnare în stare uscată (390 kV) şi tensiunea de conturnare sub ploaie artificială (290 kV).

4) Transformatorul de tensiune a fost încercat conform schemei din figura 19. Rezultatele încercărilor se dau în oscilogramele din figura 20 care arată că nivelul de izolaţie a transformatorului nu corespunde la 450 kV motiv pentru care această construcţie a fost reproiectată. La tensiunea de frecvenţă industrială transformatorul a fost încercat cu 220 kV, 100 Hz, la care izolaţia faţă de masă şi izolaţia dintre spire (încercarea concomitentă) a rezistat.

5) Transformatorul de curent a fost încercat la impuls de tensiune după schema reprezentată în figura 21. Din compararea oscilogramelor din

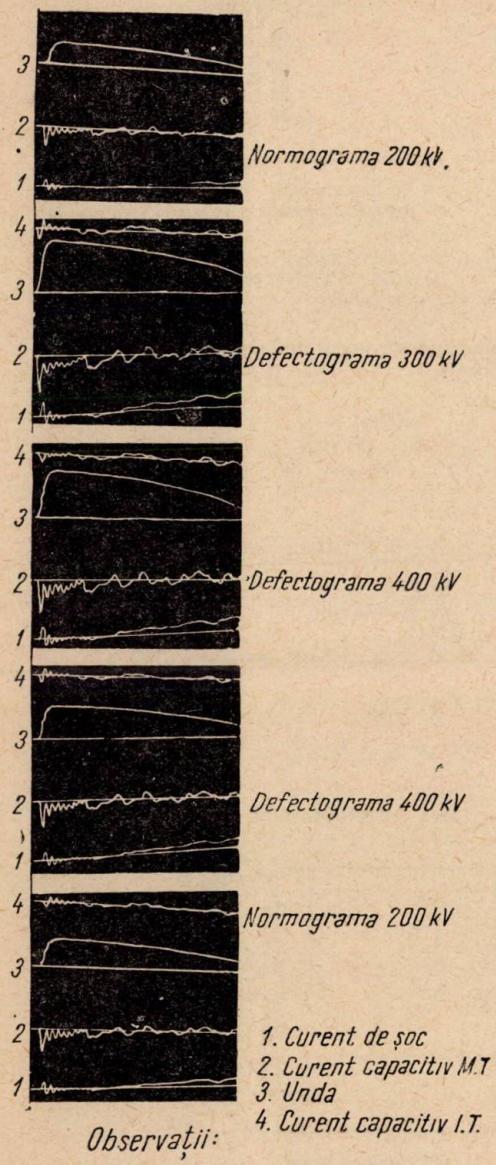


Fig. 10. — Încercarea de impuls a unui transformator de 20 MVA, 110 kV.

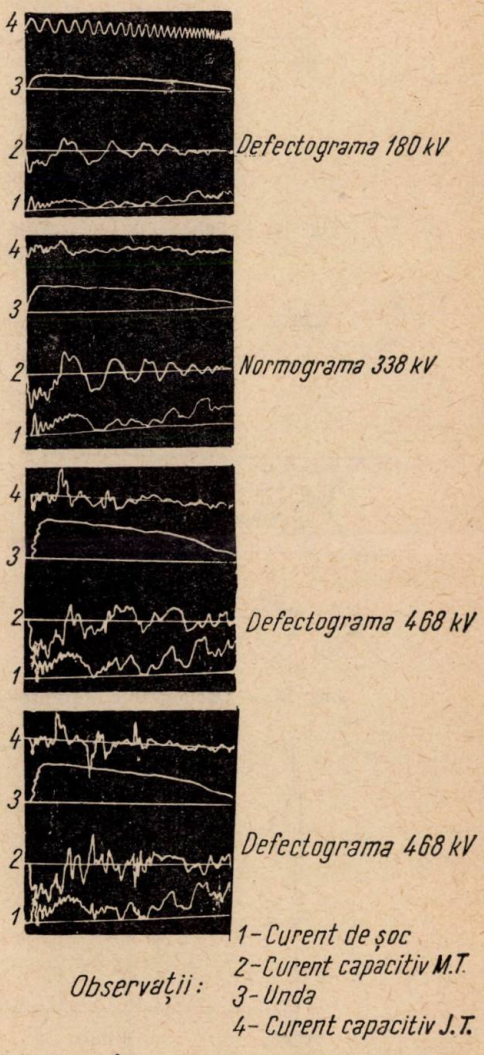


Fig. 11. — Încercarea de impuls a bobinajului de 110 kV al unui transformator de 10 MVA.

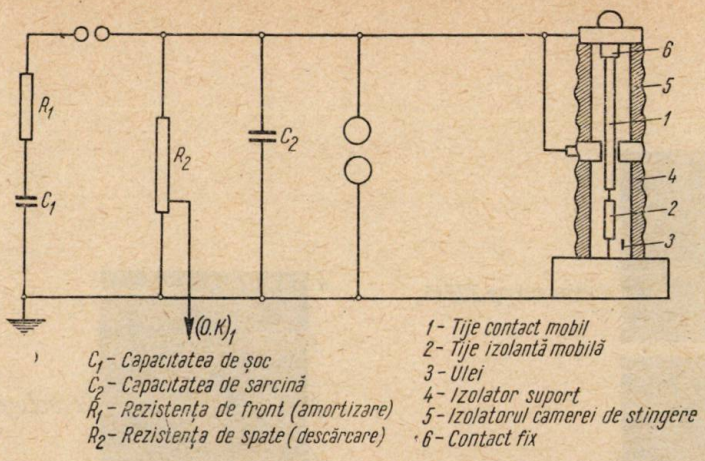


Fig. 12. — Schema de încercare a izolației față de masa întreruptorului în poziția închis.

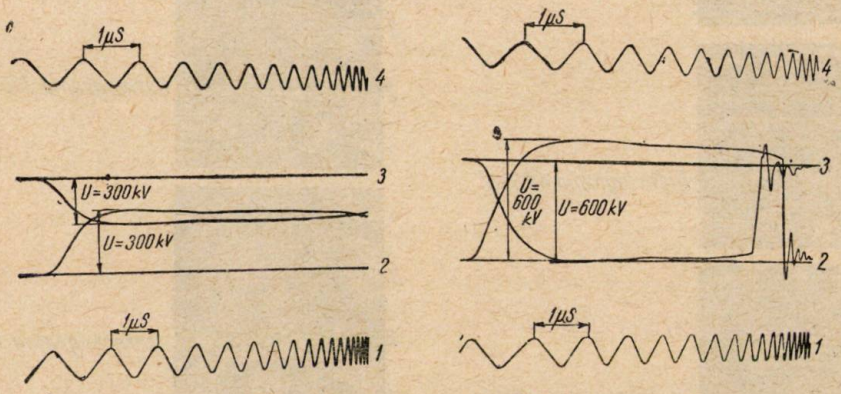


Fig. 13. — Oscilograme obținute la încercarea întreruptorului IUP-110.

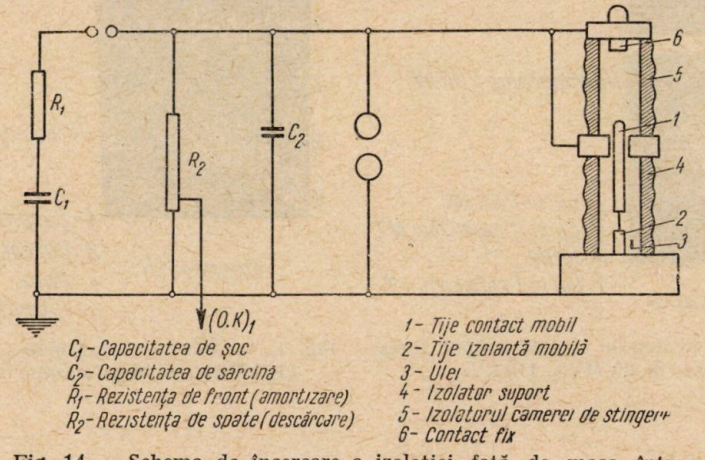


Fig. 14. — Schema de încercare a izolației față de masa întreruptorului în poziția deschis.

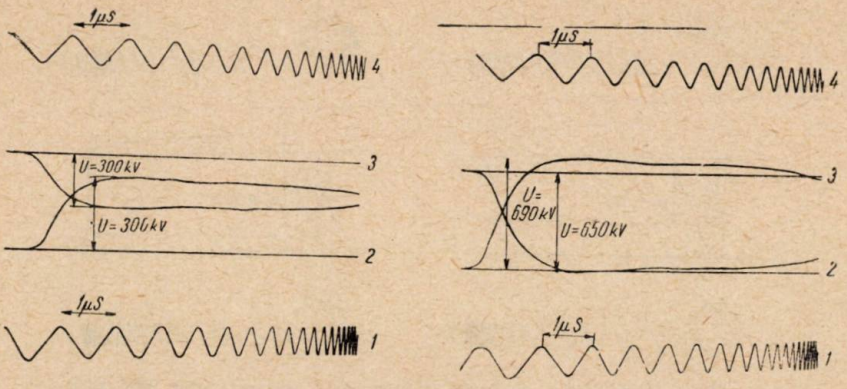


Fig. 15. — Oscilograme obținute la încercarea întreruptorului IUP-110.

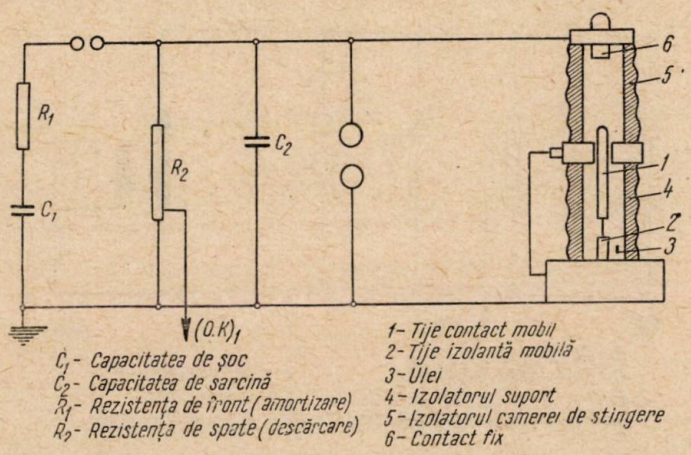


Fig. 16. — Schema de încercare a izolației camerei de stingere a întreruptorului.

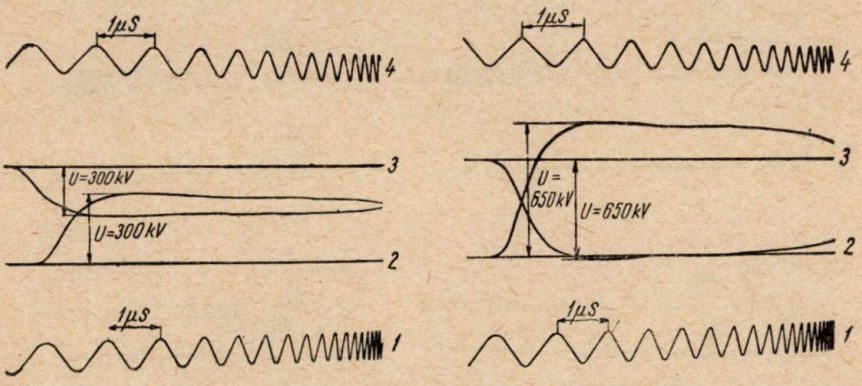


Fig. 17. — Oscilograme obținute la încercarea întreruptorului IUP-110.

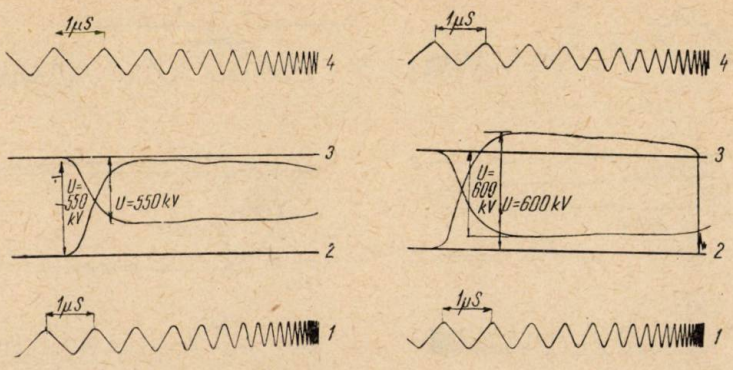


Fig. 18. — Oscilograme obținute la încercarea separatorului STE-110.

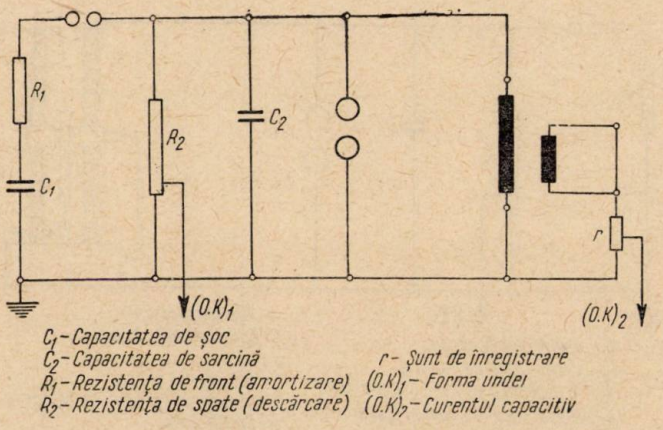


Fig. 19. — Schema de încercare a transformatorului de tensiune.

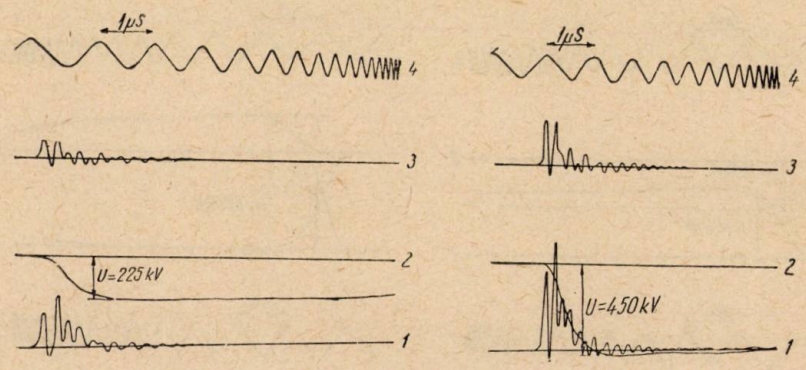


Fig. 20. — Oscilograme obținute la încercarea transformatorului de tensiune TTMU2-110.

figura 22 rezultă că izolația acestui transformator corespunde nivelului 550 kV impus pentru sisteme cu neutrul ne pus efectiv la pământ.

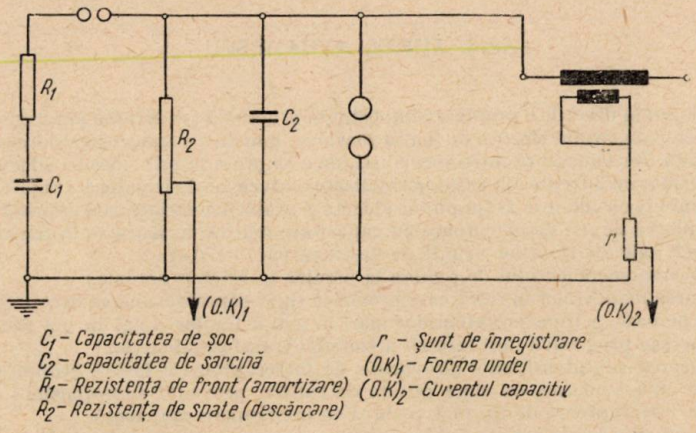


Fig. 21. — Schema de încercare a transformatorului de curent.

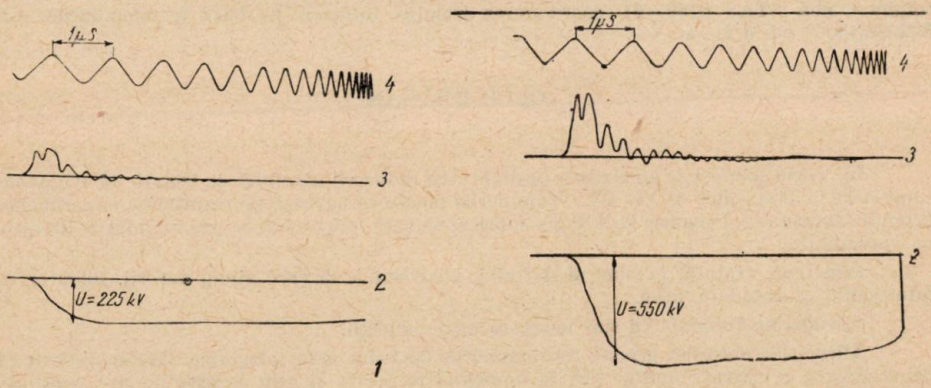


Fig. 22. — Oscilograme obținute la încercarea transformatorului de curent TPE-110.

La verificarea izolației cu tensiune de frecvență industrială de 260 kV, izolația transformatorului a rezistat cu succes.

Concluzie. Cele mai mari rezerve ale izolației la tensiunea de încercare de impuls și de frecvență industrială le are separatorul tip STE, transformatorul de curent tip TPE și întreruptorul cu ulei puțin tip IUP-110. Transformatorul de putere tip TTU corespunde din punct de vedere al izolației la tensiunea de încercare impusă de CEI cu rezerve minime, iar transformatorul de tensiune tip TMU-2-110 (în prezent abandonat) se află sub limita prescrisă de CEI.

DISCUŢII

Acad. AUREL AVRAMESCU

Autorii pun în discuţie o problemă importantă şi actuală : reducerea progresivă a nivelului de izolaţie a echipamentului electric de înaltă tensiune, mai ales a transformatoarelor. Se ştie că există o tendinţă binecunoscută între specialişti, de a se proceda prin măsuri adecuate la reducerea cu 1,2 şi chiar cu 3 trepte ale scării normalizate a nivelelor de izolaţie a transformatoarelor. Măsurile necesare se extind însă asupra unor obiecte şi probleme variate care cuprind între altele ;

— asimilarea de noi descărcătoare cu capacitate mărită de scurgere la tensiuni reziduale mai reduse decît cele ale tipurilor uzuale de descărcătoare de staţie ;

— reducerea coeficientului de punere la pămînt în reţelele actuale ;

— evitarea manevrelor în reţea care provoacă sigur supratensiuni ca deconectarea ultimei linii în gol de pe bare, a transformatoarelor mari în gol, a liniilor lungi în gol etc. ;

— reducerea progresivă fără reflexii a izolaţiei transformatoarelor ;

— reducerea supratensiunilor provocate de întreruptoarele însăşi, ştiindu-se că uneori întreruptoarele mai moderne, cu mare putere de rupere, provoacă supratensiuni de comutare mai mari decît întreruptoare de tip mai vechi şi cu întrerupere mai lentă.

Abia după ce îndeplinirea condiţiilor care permit reducerea nivelului de izolaţie este asigurată se poate trece la modificarea standardelor naţionale sau a recomandărilor internaţionale.

În acest sens, considerăm propunerile din lucrare utile şi mobilizatoare, totuşi punerea în aplicaţie a măsurilor pentru reducerea nivelului de izolaţie va mai necesita multe studii concrete bine dirijate spre a se putea ajunge la reducerea valorilor nivelelor de izolaţie şi standardul romînesc nou STAS 6489—61 coordonarea izolaţiei întocmit pe baza recomandărilor CEI. Publicaţia 71 ed. a III-a.

GLEB DRĂGAN

În cadrul lucrării se analizează posibilitatea reducerii nivelului de izolaţie al echipamentului electric al staţiilor de 110 kV. Propunerile făcute se bazează pe rezultatele experimentale privind echipamentul electric de 110 kV fabricat în ţară, precum şi pe recomandările literaturii de specialitate.

Prin tema tratată, precum şi datorită concluziilor la care ajung autorii, lucrarea este interesantă şi totodată utilă.

Considerăm totodată că sînt necesare unele obiecţii.

Afirmaţiile autorilor privind recomandările CEI sînt prea categorice. Recomandările CEI generalizează experienţa multor ţări în domeniul respectiv şi prin aceasta nu pot cuprinde o serie de detalii caracteristice normelor de încercare a izolaţiei elaborate şi aplicate în diferite ţări, cum ar fi GOST-ul, VDE etc. Valorile privind, de exemplu, nivelul de izolaţie a utilajului electric reprezintă un material deosebit de util ce stă la baza normelor cu caracter naţional din multe ţări.

Părerea autorilor că descărcătoarele tubulare nu pot asigura o protecţie sigură a transformatoarelor contra supratensiunilor atmosferice este justă dacă se consideră că descărcătorul tubular reprezintă aparatul de protecţie de bază. În mod obişnuit însă descărcătoarele tubulare asigură, în anumite condiţii, o protecţie ajutătoare a staţiilor, aparatul de bază al protecţiei fiind descărcătorul cu rezistenţă variabilă. Sub acest aspect descărcătoarele tubulare reprezintă aparate utile iar schemele de protecţie folosite în diferite ţări (inclusiv în ţara noastră) prevăd pe lîngă descărcătoare cu rezistenţă variabilă şi pe cele tubulare.

De asemenea, consider că este mai indicat să se utilizeze noţiunea de *curenţii de scurtcircuit* şi nu de *curenţii de însoţire* deoarece descărcătoarele tubulare sting arcul electric de scurtcircuit ce apare în urma amorsării descărcătorului.

În cazul reţelelor cu neutrul efectiv legat la pămînt nu are loc legarea metalică directă a tuturor punctelor de neutru la pămînt, cum rezultă din textul lucrării. Din acest punct de vedere

este necesar ca raportul dintre reactanța homopolară și directă, în cazul cînd acest raport se determină pentru diferite puncte din sistem să fie mai mic decît 3—4 iar $\frac{r_0}{x} > 1$. Consider că la aceste condiții s-au referit autorii, însă exprimarea dată poate da naștere la confuzii.

În concluzie, considerăm că problema studiată de către autori, este interesantă și că ar trebui să fie continuate preocupările în acest domeniu pentru concretizarea măsurilor ce se pot lua

STUDIEN ÜBER DIE HERABSETZUNG DES ISOLATIONSPEGELS DER 110 kV-STATIONSAUSRÜSTUNGEN

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird die Möglichkeit der Herabsetzung des Isolationspegels der Ausrüstung der elektrischen 110 kV-Trafostationen, die im Lande gefertigt ist, untersucht. Die Folgerungen der Verfasser beruhen auf den Untersuchungen der Belastungen, denen die Apparate in den konkreten Bedingungen des energetischen Systems der RVR unterworfen sind, auf die technische Prüfung des Isolations- und Schutzpegels, die in Ländern mit entwikkelter elektrotechnischer Industrie vorgenommen wurde. Die Arbeit fußt ferner auf Forschungsversuchen, die im Laboratorium der Electroputere-Werke in Craiova, hinsichtlich der Isolation, des Isolations- und Schutzpegels der inländischen 100 kV-Elektroausrüstungen unternommen worden sind.

BIBLIOGRAFIE

1. I. S. CLIFF, *The coordination of insulation of high voltage electrical installation.* IEE,Proceedings, 101, part. 1, *128* (1959).
2. PHILIP SOPRIN, I. W. GROSS, *A Quarter century of experience in insulations coordination : Basic philosophy, application, and operating experience on the AG & E system,* part III. *Power apparatus and systems,* April (1957), 58.
3. W. S. SEALLY, F. VOGEL, *A new method of obtaining insulation coordination of transformers.* AIEE Transactions, 1955, **73**, part. 3 (1955), 116.
4. А.Н. ШЕРЕНЦИС, *Уровни изоляций электрических систем сверхвысокого напряжения в СССР и за границей и возможности дальнейшего снижения испытательных напряжений.* Энергетиыа за рубежом : Снижения уровней изоляций в электрических системах, Москва-Ленинград 1959.
5. P. S. PUGH, C. P. ZIMMERMAN, *Operating experience on AG & E 132 kV system with transformer insulation reduced by two classes.* Power apparatus and systems, *29* (1957).
6. P. L. BELLASCHI, *Reduced insulation in power systems at the higher voltages — the problems it presents.* AIEE Transactions Power apparatus and systems, *26* (1956).
7. E. M. HONTER, I. R. MEADOR, W. I. RUDGE, *Reduced transformer insulation.* AIEE Transactions, *Power apparatus and systems, 29* (1957).
8. Л. И. СИРОТИНСКИЙ, *Техника высоких напряжений.* Часть III. *Перенапряжения.* ГЭИ, Москва-Ленинград.
9. Д.В. РАЗЕВИГ, *Атмосферные перенапряжения.* Москва-Ленинград, 1961.
10. P. DIMO și alții, *Tratarea neutrului pentru evitarea supratensiunilor prelungite.* Editura Academiei R.P.R., 1960.

11. ГЕРТ, ХОМА, КОЛОУСЕК, ТОПОЛЯНСКИЙ, ВИСКОСИЛ, *К вопросу о перенапряжениях.* Результаты измерений в энергосистемах Чехословакии. Реф. *336*, CIGRE (1958).
12. E. L. WHITE, M.P. REECE, *Statistical data of switching surge in the British 132 kV system.* Ref. *337*, CIGRE (1958).
13. I. B. JOHNSON, *Switching surges and arrester performance on high-voltage systems.* Ref. nr. *306*, CIGRE (1958).
14. W. J. RUDGE, W. MACMORRIS, S. B. HOWARD, *The new thyrite magnetvalve station lightning arrester.* AIEE, Transactions, **73**, part. III, B (1957), 912—920.
15. В.И. ПРУЖИНИНА-ТРАНОЬСКАЯ, Н.М. КОСЛОВА и Р.М. КОЧЕТКОВА, *Вольтамперные характеристики и пропускная способность нелинейных сопротивлений для комыутационных разрядников.*
16. B. GÄNGER, *Zulässige Schaltüberspannungen und Isolationsprüfung.* Brown Boveri Mitteilungen, **47**, *4* april (1960).
17. B. HELLER, A. VEVERKA, *Stosserscheinungen in elektrischen Maschinen.* VEB Verlag Technik — Berlin, 1957.
18. W. FRISCHMAN, O. MÜLLER, U. LAGOWITZ, D. BAHRS, *Untersuchungen bein von Erdkurzschlüssen und leerlaufenden Leitungen im 220 kV Netz.* Institut für Energetik Mitteilungen, Sonderheft, 1961.
19. H. L. RORDEN, R. S. GENG, *Productive practices ASA criterion for high voltage transmission design.* AIEE Transactions, **73**, part III A (1957), 465—472.
20. GH. HORTOPAN, *Încercarea la impuls a echipamentului electric.* I.D.T., Bucureşti, 1958.
21. * * * *Directives pour la coordination de l'isolement.* CEI — Publication *71*, 3e Edition, 1960.
22. * * * *Recommandations, pour les parafoudres: première partie: parafoudres à résistance variable,* CEI — Publication *99—1*, 1958.
23. * * * *Трансформаторы, аппараты и изоляторы высокого напряжения. Нормы и методы испытаний электрическои изоляции.* Москва, ГОСТ 1556—60, 1960.
24. * * * *Regeln und Leitsätze für die Koordination der Isolationsfestigkeit in Wechselstrom-Hochspannungs-Anlagen.* SEV 0183, 1957.
25. * * * *Leitsätze für die Bemessung und Prüfung der Isolation elektrischer Anlagen von 1 kV und darüber.* VDE 0111/1959.
26. A. AVRAMESCU, *Solicitările echipamentului staţiilor de foarte înaltă tensiune.* Electrotehnica, **7**, *12* (1959), 418—427.
27. * * * *Coordonarea izolaţiei — Nivele de izolaţie şi protecţie.* STAS 6489—61.
28. F. CAPRARU, D. CÎRSTEA, A. MARX, B. MÁTHÉ, *Încercările transformatoarelor de forţă la impuls de tensiune.* Electrotehnica, **8**, *6* (1958), 291—302.
29. D. COSTINA, A. MARX, B. MÁTHÉ, *Studii experimentale privind nivelul de izolaţie la impuls de tensiune a seriei noi de transformatoare de 110 kV.* Electrotehnica, **7** *11* (1959), 388—395.

LUCRĂRI APĂRUTE ÎN EDITURA ACADEMIEI R.P.R.

GR. C. MOISIL, **Circuite cu tranzistori**, vol. I, 142 p., 8,25 lei ; vol. II, 156 p., 8,55 lei.

* * * **Probleme de automatizare, II. Folosirea mașinilor electronice de calcul în industrie și economie. Extrase din lucrările prezentate la Consfătuirea asupra mașinilor electronice de calcul (ianuarie 1960)** 171 p., 8,55 lei.

* * * **Probleme de automatizare III. Sesiunea asupra problemelor teoretice și practice privitoare la automatizările industriale (13 octombrie 1960)**, 188 p., 8,80 lei.

C. PENESCU, **Automatica și telemecanica sistemelor energetice**, vol. III, 417 p. + 9pl., 30,20 lei.

A. MORARU, **Amplidina (mașina electrică amplificatoare de curent continuu cu cîmp transversal)**, 328 p. + 2 pl., 14,50 lei.

GH. CARTIANU, **Modulația de frecvență** (în limba rusă), 579 p. + 7 pl., 39,10 lei.

N. TIPEI, V. N. CONSTANTINESCU, AL. NICA și O. BIȚĂ, **Lagăre cu alunecare (calcul, proiectare, ungere)**, 436 p., 23,70 lei.

P. P. TEODORESCU, **Probleme plane în teoria elasticității**, 996 p. + 6 pl., 42,80 lei.

E. ZAHARESCU, **Contribuții la studiul capacității portante a fundațiilor**, 300 p. +4 pl., 16,40 lei.

V. VISARION, **Elemente pentru calculul plăcilor curbe subțiri elastice**, 385 p., 16,80 lei.

N. N. PATRAULEA, **Studii de aerodinamica hipersustentației. Zborul cu decolare și aterizare scurtă la verticală**, 627 p. + 3 pl., 32,70 lei.

F 2791/A

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

STUDII ȘI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

SERIA A

ENERGETICĂ GENERALĂ ȘI ELECTROENERGETICĂ

1963 JUL 20

2

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
St. cerc. energ. Vol. 13 Nr. 2-A p. 173—330 București 1963

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Seria A

ENERGETICĂ GENERALĂ ŞI ELECTROENERGETICĂ

Tomul XIII, nr. 2, 1963 **Apare de 4 ori pe an**

COMITETUL DE REDACŢIE

Acad. I. S. GHEORGHIU;
Acad. R. RĂDULEŢ,
— *redactor responsabil*;
Acad. A. AVRAMESCU,
Acad. M. BERCOVICI,
M. MARINESCU, membru corespondent al Academiei R.P.R.;
C. APETREI — *redactor responsabil adjunct*;
E. ARIE — *secretar ştiinţific*;
C. BĂLĂ;
CS. NAGY.

Redacţia: BUCUREŞTI, Şos. Vitan nr. 236

Energetică generală

CONSIDERAȚII ASUPRA SISTEMELOR DE TRANSPORT DE COMBUSTIBIL ȘI ENERGIE ELECTRICĂ

CONSIDERAȚII ASUPRA SISTEMELOR DE TRANSPORT DE COMBUSTIBIL ȘI ENERGIE ELECTRICĂ

M. ELEFTERESCU, ȘT. KOVÁCS și GH. TRANDAFIRESCU
M. ELEFTERESCU, ȘT. KOVÁCS și GH. TRANDAFIRESCU

620 98.621.315 + 656.2 : 662.62
620 98.621.315 + 656.2 : 662.62

Repartiția neuniformă a surselor și consumatorilor de energie, atît pe glob, cît și în interiorul fiecărei țări, precum și necesitatea de a găsi soluții tehnico-economice cît mai avantajoase pentru utilizarea energiei, au impus specialiștilor, din majoritatea țărilor, efectuarea de cercetări și studii în scopul determinării unor soluții tehnico-economice cît mai avantajoase pentru utilizarea energiei.

Dată fiind legătura strînsă existentă între sectorul energetic și cel al transportului, ca urmare a faptului că fiecare constituie un factor de cel puțin important în prețul de cost al celuilalt, cercetările îndreptate în direcția îmbunătățirii randamentelor de utilizare a energiei, au trebuit să se răsfrîngă și asupra sistemelor de transport.

În aceste condiții, sub forma sa generală, problema a cărei soluționare optimă se urmărește apare sub următoarea formă: într-o regiune oarecare există una, sau mai multe, surse de energie primară, la anumite distanțe de acestea există diverși consumatori care solicită o anumită formă de energie utilizabilă; care sînt condițiile cele mai avantajoase de a transporta și de a transforma energia primară în energie utilizabilă, capabilă să satisfacă solicitările consumatorilor?

În ceea ce privește transportul energiei se disting două categorii de aspecte:

sub ce formă este mai indicat a se transporta energia (sub formă de energie primară — de ex. cărbune, gaz metan — sau sub formă de energie transformată — de ex. energie electrică)?

— care sînt sistemele de transport cele mai adecvate (transportul pe calea ferată, transportul rutier etc.)?

Această specificare separată a celor două categorii de aspecte are desigur, numai rolul de a ne ajuta în precizarea ideilor. În cazurile reale, soluționarea optimă a problemei transportului de energie trebuie să ia în considerare simultan ambele laturi ale problemei.

În ceea ce privește transformarea energiei primare în energie utilizabilă există, de asemenea, două categorii de aspecte:

— care sînt condițiile tehnice cele mai corespunzătoare pentru realizarea acestei transformări (procese tehnologice, utilaje, mărimea agregatelor etc.)?

— unde anume este mai indicat a se amplasa instalațiile de transformare (la sursa de energie primară sau la consumator)?

În timp ce la rezolvarea aspectelor privind alegerea proceselor tehnologice, utilajelor etc., există o oarecare independență față de celelalte probleme, rezolvarea aspectelor privind amplasarea instalațiilor de transformare este de neconceput fără luarea în considerare a problemelor de transport.

În ansamblul ei, problema transportului de energie în condiții optime, deși cu multiple aspecte, constituie un tot unitar și, ca atare, impune o rezolvare de aceeași natură.

Soluționarea problemei impune, de asemenea, necesitatea stabilirii unor mărimi, sau indici caracteristici, care să ofere posibilitatea comparării diverselor sisteme de transport ce vin în considerare ca fiind realizabile în condițiile tehnicii actuale.

Este evident că indicele a cărui valoare interesează în primul rînd, ca și în alte probleme similare, este prețul de cost.

Un al doilea indice ce trebuie luat în considerare îl constituie mărimea investițiilor.

În sfîrșit, cel de-al treilea indice ce interesează este solicitarea specifică a surselor de energie.

Aceștia sînt principalii indici ce se iau în considerare, în majoritatea cazurilor, pentru compararea sistemelor de transport.

Trebuie menționat însă că, în afara acestora, este necesar a se lua în considerare o serie de alți factori care, în condiții particulare, pot căpăta o asemenea importanță încît să modifice substanțial soluționarea problemei. Dintre aceștia menționăm:

— capacitatea maximă de transport a sistemului respectiv și condițiile în care aceasta poate fi mărită;

— timpul necesar efectuării transportului, a cărui mărime depinde, în primul rînd, de viteza medie (comercială) a sistemului de transport considerat;

— existența unor anumite mijloace de transport sau necesitatea de a construi mijloace noi de transport;

— disponibilitatea unor anumite materiale și condițiile în care ele pot fi procurate;

— condiții geografice;

— evoluția posibilă în timp a tehnicii, care ar putea atrage după sine modificarea indicilor caracteristici principali și deci a raporturilor existente actualmente, din punctul de vedere al indicilor respectivi, între diversele sisteme de transport.

În cazul țărilor socialiste, pe lîngă factori de natura celor menționați, mai intervin o serie de alți factori, specifici statelor socialiste, ca de exemplu :

— interdependența ce există între transport în general și celelalte ramuri ale economiei naționale ;

— necesitatea dezvoltării armonioase a tuturor regiunilor țării.

Analizînd cele menționate mai sus, trebuie să remarcăm faptul că primii trei indici — prețul de cost, investiția și solicitarea specifică a surselor de energie — denumiți de noi *indici principali*, sînt singurii indici care permit compararea sistemelor de transport din punct de vedere economic și energetic ; ceilalți factori, fiind pasibili de evaluări subiective, nu se pot cuprinde în metodele de comparare a sistemelor de transport decît prin intermediul indicilor principali și în măsura în care ei influențează acești indici.

O a doua remarcă este aceea că, dată fiind multitudinea aspectelor problemei transporturilor, diversitatea situațiilor posibile și complexitatea factorilor de care trebuie să se țină seama, este imposibil a se da soluții general valabile, fiecare caz urmînd a fi analizat pe baza condițiilor particulare care îi sînt caracteristice ; extinderea soluției adoptate pentru un anumit caz nu se poate face asupra altuia decît cu multă prudență și discernămînt.

În cazul general în care se urmărește rezolvarea problemei transporturilor de combustibil și energie pentru ansamblul unei economii energetice, de exemplu pentru o țară, în care există mai multe surse cu aceeași formă de combustibil (energie) și, evident, mai mulți consumatori, problema poate îmbrăca aspecte noi în funcție de raporturile cantitative existente între suma solicitărilor de energie ale consumatorilor (ΣQ) și suma disponibilităților de energie ale surselor respective (ΣP), între mărimile respective putînd exista relații de forma :

$$\text{a)} \quad \Sigma Q = \Sigma P,$$

$$\text{b)} \quad \Sigma Q < \Sigma P.$$

Traducînd expresiile de mai sus, se poate spune :

— în cazul a) — economia energetică respectivă este obligată să consume întreaga cantitate de combustibil de care dispune, indiferent de condițiile de preț și investiții specifice surselor sale ;

— în cazul b) — economia energetică considerată, dispunînd de surse de energie mai mari decît are nevoie pentru consum, nu este obligată să apeleze la toate sursele sale, avînd latitudinea a le utiliza pe cele mai convenabile.

Cele două situații menționate pot conduce la rezolvări diferite în ceea ce privește alimentarea cu combustibil a consumatorilor. Astfel :

178 M. ELEFTERESCU, ȘT. KOVÁCS și GH. TRANDAFIRESCU 4

— în cazul $\Sigma Q = \Sigma P$, existînd obligația de a se transporta întreaga cantitate de combustibil de care se dispune, problema trebuie rezolvată în sensul alegerii acelor soluții care să conducă la cheltuieli minime pentru transport;

— în cazul $\Sigma Q < \Sigma P$, cheltuielile pentru transport nu mai sînt ele singure cele care determină alegerea soluției, ci ele intervin numai cu o anumită pondere în totalul cheltuielilor necesare exploatării surselor de

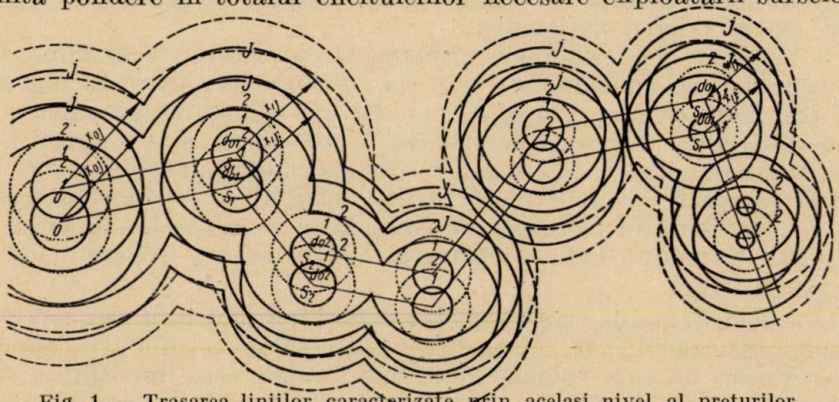


Fig. 1. — Trasarea liniilor caracterizate prin același nivel al prețurilor.

Fig. 1. — Trasarea liniilor caracterizate prin același nivel al prețurilor.

combustibil și transportului acestuia la consumator. În acest caz, rezolvarea problemei este mai complicată și ea trebuie dirijată în sensul alegerii acelor soluții care să asigure un preț de cost minim la consumator.

Avînd în vedere cele de mai sus, se poate face mențiunea că pentru rezolvarea problemei privind alimentarea unor consumatori cu combustibil din diferite centre de producție se pot utiliza, în funcție de situațiile existente, următoarele criterii de rezolvare:

= preț de cost al transportului minim;

= preț de cost al combustibilului la consumator minim;

= investiții minime în mijloacele pentru transportul combustibilului și energiei;

= investiții minime în industria energetică și cea a transportului;

= solicitare specifică minimă a surselor de combustibil și energie.

Aplicarea unuia sau altuia dintre aceste criterii este determinată de condițiile concrete ale economiei considerate și de politica energetică a țării respective.

Pentru crearea unei vederi de ansamblu asupra condițiilor de alimentare cu combustibil a diverselor centre consumatoare din o regiune dată, precum și pentru a se permite delimitarea zonelor de influență ale centrelor producătoare de combustibil, în continuare se tratează problema determinării unor linii caracterizate prin același cost al transportului sau al combustibilului.

Fie situația din figura 1, în care se iau în considerare transportul pe calea ferată și transportul auto (atît de la centrul producător O cît și

5 TRANSPORTUL DE COMBUSTIBIL 179

de la fiecare stație de cale ferată, în acest ultim caz luîndu-se în considerare și transbordarea combustibilului).

În figura 1 s-au utilizat notațiile următoare :

O — centrul producător ;

$S_1, S_2, \ldots, S_i$ — stații de cale ferată la care este posibilă transbordarea și care pot fi considerate, în același timp și consumatori ;

$d_{01}, d_{02}, \ldots, d_{0i}$ — distanțele de la centrul producător O pînă la stațiile de cale ferată considerate ;

$X_1, X_2, \ldots, X_j$ — nivele ale costului transportului (combustibilului) :

$X_{01}, X_{02}, \ldots, X_{0j}$ — distanțele de la sursa O la liniile de nivel $1,2,\ldots j$;

$\left.\begin{matrix} X_{11}, X_{12}, \ldots, X_{1j} \\ X_{21}, X_{22}, \ldots, X_{2j} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ X_{i1}, X_{i2}, \ldots, X_{ij} \end{matrix}\right\}$ — distanțele de la punctele $S_1, S_2, \ldots, S_i$ la liniile de nivel $1,2,\ldots j$.

Pentru costul transportului pe calea ferată se utilizează o expresie de forma $C = a_2 + b_2 d$, iar pentru transportul auto, o expresie similară $C' = a_1 + b_1 d$. Notînd de asemenea cu $C_{01}, C_{02}, \ldots, C_{0j}$ și $C_{i1}, C_{i2}, \ldots, C_{ij}$, costul transportului de la punctele O și $S_1, S_2, \ldots, S_i$ pînă la liniile de nivel $1,2,\ldots j$ se pot scrie următoarele relații :

— Pentru punctul O

linia de cost 1 :

$$C_{01} = a_2 + b_2 X_{01} \qquad X_{01} = \frac{C_{01} - a_2}{b_2};$$

linia de cost 2 :

$$C_{02} = a_2 + b_2 X_{02} \qquad X_{02} = \frac{C_{02} - a_2}{b_2};$$

. . . . . .

linia de cost j :

$$C_{0j} = a_2 + b_2 X_{0j} \qquad X_{0j} = \frac{C_{0j} - a_2}{b_2}.$$

— Pentru punctul 1

linia de cost 1 :

$$C_{11} = a_1 + b_1 d_{01} + t + a_2 + b_2 X_{11} \qquad X_{11} = \frac{C_{11} - a_2}{b_2} - \frac{t + a_1 + b_1 d_{01}}{b_2};$$

linia de cost 2 :

$$C_{12} = a_1 + b_1 d_{01} + t + a_2 + b_2 X_{12} \qquad X_{12} = \frac{C_{12} - a_2}{b_2} - \frac{t + a_1 + b_1 d_{01}}{b_2};$$

. . . . . .

linia de cost j :

$$C_{1j} = a_1 + b_1 d_{01} + t + a_2 + b_2 X_{1j} \qquad X_{1j} = \frac{C_{1j} - a_2}{b_2} - \frac{t + a_1 + b_1 d_{01}}{b_2}.$$

— Pentru punctul i

linia de cost 1 :

$$C_{i1} = a_1 + b_1 d_{0i} + t + a_2 + b_2 X_{i1} \qquad X_{i1} = \frac{C_{i1} - a_2}{b_2} - \frac{t + a_1 + b_1 d_{0i}}{b_2};$$

linia de cost 2 :

$$C_{i2} = a_1 + b_1 d_{0i} + t + a_2 + b_2 X_{i2} \qquad X_{i2} = \frac{C_{i2} - a_2}{b_2} - \frac{t + a_1 + b_1 d_{0i}}{b_2};$$

. . . . . .

linia de cost j :

$$C_{ij} = a_1 + b_1 d_{0i} + t + a_2 + b_2 X_{ij} \qquad X_{ij} = \frac{C_{ij} - a_2}{b_2} - \frac{t + a_1 + b_1 d_{0i}}{b_2}.$$

Punînd condiția ca liniile de nivel cu același indice, din jurul fiecărui punct, să aibă valori egale, adică :

$$C_{01} = C_{11} = C_{21} = \ldots = C_{i1} = C_1,$$
$$C_{02} = C_{12} = C_{22} = \ldots = C_{i2} = C_2,$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$C_{0j} = C_{1j} = C_{2j} = \ldots = C_{ij} = C_j,$$

pentru distanțele de la punctele $O, S_1, S_2, \ldots, S_i$, la nivelele $1,2,\ldots,j$, rezultă expresii de forma

$$X_{11} = X_{01} - \frac{t + a_1 + b_1 d_{01}}{b_2} = X_{01} - \frac{C_{s1} + t}{b_2},$$

$$X_{12} = X_{02} - \frac{t + a_1 + b_1 d_{01}}{b_2} = X_{02} - \frac{C_{s1} + t}{b_2},$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$X_{1j} = X_{0j} - \frac{t + a_1 + b_1 d_{01}}{b_2} = X_{0j} - \frac{C_{s1} + t}{b_2},$$

$$X_{i1} = X_{01} - \frac{t + a_1 + b_1 d_{0i}}{b_2} = X_{01} - \frac{C_{si} + t}{b_2},$$

$$X_{i2} = X_{02} - \frac{t + a_1 + b_1 d_{0i}}{b_2} = X_{02} - \frac{C_{si} + t}{b_2},$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$X_{ij} = X_{0j} - \frac{t + a_1 + b_1 d_{0i}}{b_2} = X_{0j} - \frac{C_{si} + t}{b_2}.$$

Rezumînd, se procedează în felul următor: se determină costul transportului pe calea ferată pînă în punctele S_1, S_2, ..., S_i, adică C_{s1}, C_{s2}, ..., C_{si}; se precizează nivelele de cost cu care se lucrează, adică C_1, C_2, ..., C_j; aplicînd formulele respectiv se determină distanțele X_{i1}, X_{i2}, ..., X_{ij} de la punctele O, S_1, S_2, ..., S_i, la liniile de nivel considerate.

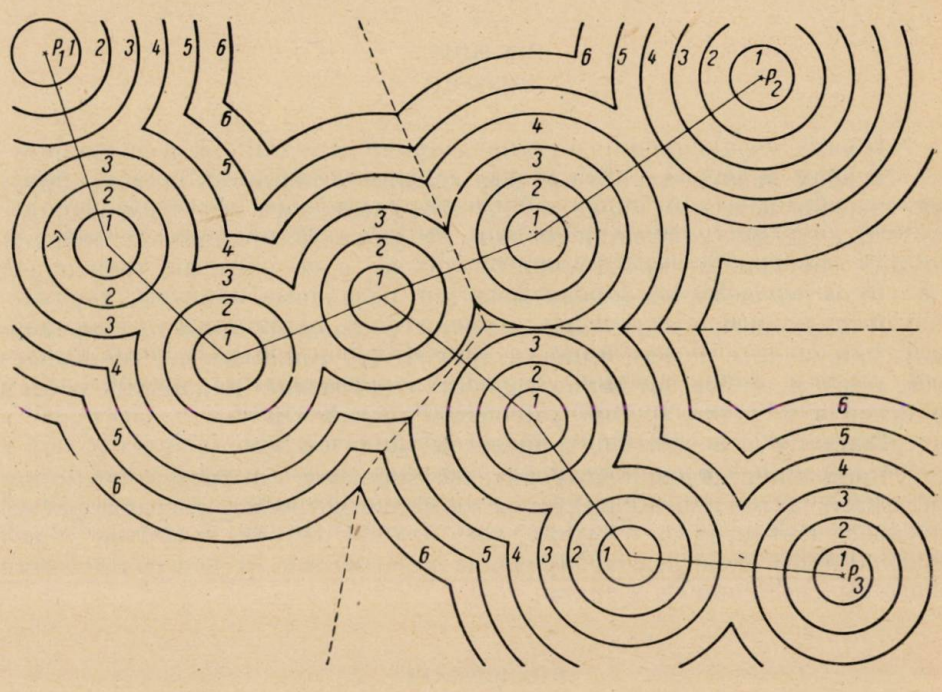


Fig. 2. — Delimitarea zonelor de influență ale centrelor producătoare, pe baza liniilor de preț de același nivel.

În cazul în care se consideră că în jurul fiecărui punct O, S_1, S_2, ..., S_i există drumuri uniform repartizate, liniile de nivel vor fi niște cercuri concentrice cu centrele în punctele menționate și cu razele X_{i1}, X_{i2}, ..., X_{ij}; în situațiile reale, distanțele respective se vor măsura pe drumurile existente.

În cazul în care există mai multe centre producătoare P_1, P_2, P_3, se trasează liniile de nivel corespunzătoare, ca în cazul precedent; se va ajunge la situația în care anumite linii de nivel, de aceeași valoare, corespunzînd la două centre producătoare, se vor intersecta (fig. 2). Prin unirea corespunzătoare a acestor puncte de intersecție se delimitează zonele de influență ale centrelor producătoare considerate.

182 M. ELEFTERESCU, ŞT. KOVÁCS şi GH. TRANDAFIRESCU 8

О СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТА ТОПЛИВА И ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

О СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТА ТОПЛИВА И ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

РЕЗЮМЕ

РЕЗЮМЕ

В виду неравномерного распределения источников и потребителей энергии и тесной связи между энергетическим сектором и транспортом, исследования, направленные на улучшение полезного использования энергии, распространяются также и на системы транспорта топлива и передачи электроэнергии.

В виду неравномерного распределения источников и потребителей энергии и тесной, связи между энергетическим сектором и транспортом, исследования, направленные на улучшение полезного использования энергии, распространяются также и на системы транспорта топлива и передачи электроэнергии.

В настоящей работе анализируются различные аспекты, характеризующие вопрос обеспечения потребителей топливом и электроэнергией, причем особое внимание уделяется сравнению различных систем транспорта с точки зрения утонения сравнительных показателей и разграничения зон влияния упомянутых центров.

Вопрос обеспечения потребителей топливом анализируется как в предположении, что необходимость в топливе потребителей равна располагаемой энергии, так и в случае, если эта необходимость меньше общей располагаемой энергии, что приводит к возможности неиспользования некоторых источников энергии.

BIBLIOGRAFIE

BIBLIOGRAFIE

1. Т. С. Хачатуров, *Экономика транспорта*. Изд. Акад. Наук СССР, Москва, 1959.
2. K. Kaissling, A. Th. Gross, *Transportul combustibililor solizi, lichizi şi gazoşi*. B.W.K., februarie (1959).
3. * * * *Le prix de revient dans l'industrie des transports intérieurs*. Nations Unies, Genève, 1956.
4. G. Lelescu, *Probleme ale preţului de cost al transportului feroviar*. Probleme economice, 7 (1957).
5. G. Falomo, *Comparaţia economică a transportului de combustibil şi energie electrică în Italia, privind în vedere alegerea amplasării centralelor termice*. Conferinţa Mondială a Energiei, Montreal, 1958.

1. Т. С. Хачатуров, *Экономика транспорта*. Изд. Акад. Наук СССР, Москва, 1959.
2. K. Kaissling, A. Th. Gross, *Transportul combustibililor solizi, lichizi şi gazoşi*. B.W.K., februarie (1959).
3. * * * *Le prix de revient dans l'industrie des transports intérieurs*. Nations Unies, Genève, 1956.
4. G. Lelescu, *Probleme ale preţului de cost al transportului feroviar*. Probleme economice, 7 (1957).
5. G. Falomo, *Comparaţia economică a transportului de combustibil şi energie electrică în Italia, privind în vedere alegerea amplasării centralelor termice*. Conferinţa Mondială a Energiei, Montreal, 1958.

Energetică generală

EXPRIMAREA REGIMULUI DE CONSUM ȘI DE PRODUCERE A ENERGIEI ȘI PURTĂTORILOR DE ENERGIE ÎN ECUAȚIILE BILANȚULUI ENERGETIC GENERAL

EXPRIMAREA REGIMULUI DE CONSUM ȘI DE PRODUCERE A ENERGIEI ȘI PURTĂTORILOR DE ENERGIE ÎN ECUAȚIILE BILANȚULUI ENERGETIC GENERAL

DE

T. MICLESCU

DE

T. MICLESCU

620.92 :336.12

620.92 :336.12

1. În prezentul articol se tratează unul din aspectele întocmirii modelului matematic al bilanțului energetic general [1]. Se demonstrează că, în cazul cel mai general, când există instalații producătoare și consumatoare de combustibil și energie între care nu există posibilități de stocare, trebuie să se țină seama și de regimul de producere respectiv de consum, al acestor instalații.

1. În prezentul articol se tratează unul din aspectele întocmirii modelului matematic al bilanțului energetic general [1]. Se demonstrează că, în cazul cel mai general, când există instalații producătoare și consumatoare de combustibil și energie între care nu există posibilități de stocare, trebuie să se țină seama și de regimul de producere respectiv de consum, al acestor instalații.

2. După cum s-a mai arătat într-o serie de articole anterioare [1], [2], [3] modelul matematic al bilanțului energetic general se exprimă prin următorul sistem de ecuații liniare :

2. După cum s-a mai arătat într-o serie de articole anterioare [1], [2], [3] modelul matematic al bilanțului energetic general se exprimă prin următorul sistem de ecuații liniare :

$$\left.\begin{array}{l} \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \sum_{k=1}^{s}\sum_{l=1}^{t}\sum_{m=1}^{u} x_{i,j,k,l,m} = W_{i,j} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \end{array}\right\} p+r, \qquad (1)$$

$$\left.\begin{array}{l} \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{r}\sum_{k=1}^{s} x_{i,j,k,l,m}\, b_{i,j,k,l,m} \leqslant R_{l,m} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \end{array}\right\} t+u \qquad (2)$$

în care

W — consumul de energie utilă de o anumită formă într-un anumit centru de consum;

R — resursa de energie de o anumită formă dintr-un anumit centru de energie;

x — cantitatea de energie utilă debitată de un lanț energetic dat pentru acoperirea consumului de energie W;

b — cantitatea de energie primară necesară pentru producerea unității de energie utilă;

i — indice care se referă la forma de energie utilă;

p — numărul de forme de energie utilă;

j — indice care se referă la centrul de consum;

r — numărul de centre de consum;

k — indice care se referă la structura lanțului;

s — numărul de structuri de lanț pentru i și l dați;

l — indice care se referă la forma de energie primară;

t — numărul de forme de energie primară;

m — indice care se referă la sursa de energie;

u — numărul surselor de energie.

Pe baza acestui model matematic se face optimizarea bilanțului energetic general. Criteriul ales este minimul cheltuielilor anuale exprimate de funcția

$$C = \sum_{i=1}^{p} \sum_{f=1}^{r} \sum_{k=1}^{s} \sum_{l=1}^{t} \sum_{m=1}^{u} a_{i,j,k,l,m}\, x_{i,j,k,l,m}, \tag{3}$$

unde a reprezintă fie cheltuielile de calcul specifice*) dacă este vorba de bilanțul energetic general de perspectivă, fie cheltuielile de producție specifice, dacă este vorba de bilanțul energetic general curent.

3. În ecuațiile modelului matematic prezentat mai sus s-a făcut abstracție de regimul de producere și de consum al energiei și purtătorilor de energie. Această abstracție este admisibilă dacă posibilitățile de stocare fac independentă producția de energie de consumul ei. După cum se va arăta în cele ce urmează cu ajutorul unui exemplu simplu, dacă această independență nu există, pentru a exprima corect bilanțul energetic general prin modelul său matematic, trebuie să ținem seama de ritmul de producere și consum al energiei.

Presupunem că avem doi consumatori care pot consuma fie gaz natural fie păcură, primul având un caracter sezonier (de exemplu fabrici de zahăr) iar cel de-al doilea un caracter permanent (de exemplu cuptoare industriale). Regimul de consum al instalațiilor celor doi consumatori, considerînd consumul în cursul unui trimestru constant și egal cu consu-

*) Expresia cheltuielilor de calcul specifice este

$$a = c + e_n\, i,$$

în care: c — cheltuielile de producție specifice;
i — investițiile specifice;
e_n — coeficientul normat al eficacității economice.

mul mediu din trimestrul respectiv este reprezentat grafic în figura 1. Facem ipoteza că producția anuală a sursei de gaz natural este egală cu consumul total de căldură al instalațiilor celor doi consumatori, regimul de producție al sursei este constant, iar posibilități de stocare nu există. Regimul sursei de gaz natural este reprezentat tot în figura 1. De asemenea presupunem că posibilitățile de stocare a păcurii fac independentă această sursă de energie de regimul de consum, iar cantitatea de care se dispune este foarte mare. Admitem că lanțul de producere a căldurii folosind gazul natural, conduce la un preț de cost pe unitatea de căldură

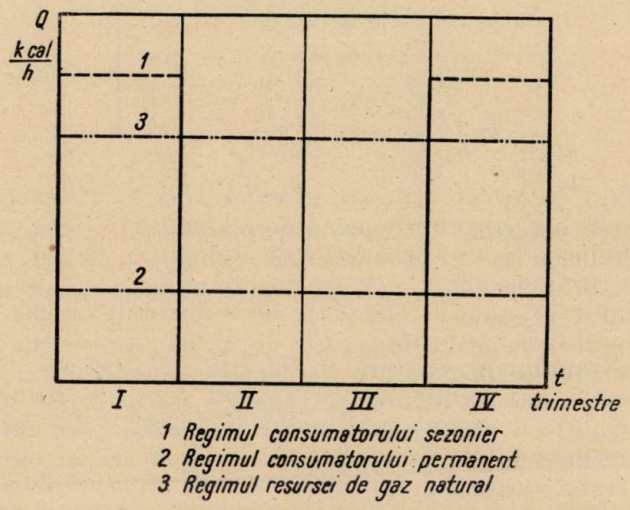


Fig. 1. — Graficul regimurilor de producție și consum a energiei.

produsă, mai redus decît în cazul folosirii păcurii. În sfîrșit, presupunem randamentele lanțurilor energetice de alimentare ale celor doi consumatori egale între ele, și aceleași indiferent dacă se consumă gaz natural sau păcură.

Ne propunem ca în baza expresiilor (1), (2), (3) și a datelor problemei să găsim soluția care să conducă la cheltuieli anuale minime pentru alimentarea cu combustibil a celor doi consumatori. Este evident că soluția va consta în alimentarea celor doi consumatori cu gaz natural. Dar această soluție nu poate fi aplicată din cauza regimului neuniform de consum al consumatorului sezonier. În adevăr, deși consumul anual de căldură al instalațiilor consumatoare este egal cu producția anuală a sursei de gaz natural, totuși, așa cum se poate urmări din figura 1, în trimestrele I și IV consumul total de căldură este mai mare decît producția echivalentă de căldură a sursei de gaz.

Rezultă deci că pentru a descrie corect realitatea trebuie să scriem expresiile (1) și (2) ale modelului matematic al bilanțului energetic de perspectivă, pentru fiecare sector în parte al curbei de regim. Astfel, pentru

186 T. MICLESCU 4

exemplul considerat, expresiile (1) și (2) se vor scrie în modul următor :

exemplul considerat, expresiile (1) și (2) se vor scrie în modul următor :

$$\left.\begin{aligned}
&x^{\mathrm{I}}_{1_1} + x^{\mathrm{I}}_{1_2} = w^{\mathrm{I}}_1 ,\\
&x^{\mathrm{I}}_{1_1} + x^{\mathrm{I}}_{1_2} = w^{\mathrm{I}}_1 ,\\
&x^{\mathrm{IV}}_{1_1} + x^{\mathrm{IV}}_{1_2} = w^{\mathrm{IV}}_1 ,\\
&x^{\mathrm{IV}}_{1_1} + x^{\mathrm{IV}}_{1_2} = w^{\mathrm{IV}}_1 ,\\
&x^{\mathrm{I}}_{2_1} + x^{\mathrm{I}}_{2_2} = w^{\mathrm{I}}_2 ,\\
&x^{\mathrm{I}}_{2_1} + x^{\mathrm{I}}_{2_2} = w^{\mathrm{I}}_2 ,\\
&x^{\mathrm{IV}}_{2_1} + x^{\mathrm{IV}}_{2_2} = w^{\mathrm{IV}}_2 ,\\
&x^{\mathrm{IV}}_{2_1} + x^{\mathrm{IV}}_{2_2} = w^{\mathrm{IV}}_2 ,
\end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

$$\left.\begin{aligned}
&b_{1_1}\alpha^{\mathrm{I}}_1 x^{\mathrm{I}}_{1_1} + b_{2_1}\alpha^{\mathrm{I}}_2 x^{\mathrm{I}}_{2_1} \leqslant \beta^{\mathrm{I}}_1 r^{\mathrm{I}}_1 ,\\
&b_{1_1}\alpha^{\mathrm{I}}_1 x^{\mathrm{I}}_{1_1} + b_{2_1}\alpha^{\mathrm{I}}_2 x^{\mathrm{I}}_{2_1} \leqslant \beta^{\mathrm{I}}_1 r^{\mathrm{I}}_1 ,\\
&b_{1_1}\alpha^{\mathrm{IV}}_1 x^{\mathrm{IV}}_{1_1} + b_{2_1}\alpha^{\mathrm{IV}}_2 x^{\mathrm{IV}}_{2_1} \leqslant \beta^{\mathrm{IV}}_1 r^{\mathrm{IV}}_1 ,\\
&b_{1_1}\alpha^{\mathrm{IV}}_1 x^{\mathrm{IV}}_{1_1} + b_{2_1}\alpha^{\mathrm{IV}}_2 x^{\mathrm{IV}}_{2_1} \leqslant \beta^{\mathrm{IV}}_1 r^{\mathrm{IV}}_1 ,
\end{aligned}\right\} \qquad (5')$$

$$b_{1_2} x^{\mathrm{I}}_{1_2} + b_{2_2} x^{\mathrm{I}}_{2_2} + \ldots + b_{1_2} x^{\mathrm{IV}}_{1_2} + b_{2_2} x^{\mathrm{IV}}_{2_2} \leqslant R_2 , \qquad (5'')$$

$$b_{1_2} x^{\mathrm{I}}_{1_2} + b_{2_2} x^{\mathrm{I}}_{2_2} + \ldots + b_{1_2} x^{\mathrm{IV}}_{1_2} + b_{2_2} x^{\mathrm{IV}}_{2_2} \leqslant R_2 , \qquad (5'')$$

în care, în afara notațiilor utilizate în expresiile (1), (2), s-au mai folosit :

în care, în afara notațiilor utilizate în expresiile (1), (2), s-au mai folosit :

I_1, I_2, IV = indicele lanțului energetic de alimentare cu gaz sau cu păcură a) consumatorului sezonier ;

I_1, I_2, IV = indicele lanțului energetic de alimentare cu gaz sau cu păcură a) consumatorului sezonier ;

I_1, I_2 = indicele lanțului energetic de alimentare cu gaz sau cu păcură a) consumatorului permanent ;

I_1, I_2 = indicele lanțului energetic de alimentare cu gaz sau cu păcură a) consumatorului permanent ;

w_1, w_2 = consumul de căldură în diferite sectoare ale curbei de regim a consumatorului cu regim sezonier sau cu regim permanent ;

r_1, r_2 = resursa de gaz natural în diferite sectoare ale curbei de regim ;

R_1, R_2 = resursa totală de păcură în diferite sectoare ale curbei de regim ;

α, β = coeficientul de neuniformitate al consumului, reprezentînd raportul dintre valoarea maximă și valoarea medie a consumului de căldură, respectiv raportul dintre valoarea maximă și valoarea medie a resursei ca raport al valorilor minimă și medie în procesul producției sursei de energie.

În cazul particular considerat, coeficienții α și β sînt unitari iar b_{1_1}, b_{1_2}, b_{2_1}, b_{2_2} egali.

De remarcat că în cazul independenței regimului de consum de cel de producere, sau în situația consumului de păcură, coeficienții de neuniformitate ai regimului α și β nu mai intervin în același timp, pentru sursa independentă de regim se scrie o singură restricție care traduce faptul că în orice sector al curbei de consum se poate dispune de întreaga producție anuală a combustibilului stocabil. În funcție de cererea de combustibil stocabil rezultată în urma optimizării bilanțului și în funcție de regimul de producere a acestuia rezultă mărimea stocurilor ce trebuie create în diferite perioade ale anului.

Descrierea bilanțului energetic general cu ajutorul relațiilor (1), (2) este cu atît mai apropiată de realitate, în cazul regimurilor puternic neuniforme, cu cît curba regimului se împarte în mai multe sectoare. Nu este necesar ca aceste sectoare să cuprindă intervale de timp egale, dar ele trebuie astfel alese încît în interiorul sectorului regimul să fie cît mai uniform, adică coeficienții α și β , cît mai apropiați de unitate.

5 ASPECTE ALE MODELULUI MATEMATIC AL BILANȚULUI ENERGETIC GENERAL 187

Atunci cînd consumatorii prezintă diferite posibilități de interșanjabilitate a surselor folosite, diferențierea consumatorilor în grupe se face în funcție de posibilitățile de consum ale fiecărui grup de consumatori și de caracteristicile energetice ale acestora. În acest caz, întreaga grupă de consumatori se tratează ca un singur consumator, iar rezultatul dă toate regimurile obținute se poate repune în părțile corespunzătoare ale bilanțului energetic general.

Generalizînd, putem spune că orice bilanț energetic pe ansamblu sau pe părți ale lui conține relații de trei tipuri: (1) relații de tip material, care exprimă legătura dintre cantitățile de energie primară și cantitățile de energie secundară; (2) relații de tip material, care exprimă legătura dintre cantitățile de energie secundară și cantitățile de energie consumată; (3) relații de tip material, care exprimă legătura dintre cantitățile de energie consumată și cantitățile de energie utilă.

Cele de mai sus se aplică și producției și consumului de energie electrică.

În cazul bilanțului energetic general curent, centralele electrice existente în momentul întocmirii bilanțului sînt cunoscute. Dacă există centrale în curs de construcție, atunci se cunoaște și momentul punerii lor în funcțiune. Dacă avem în vedere centralele electrice existente și cele în curs de construcție, atunci în relațiile de forma (1), (1') și (1'') sumele din membrul drept sînt cunoscute, iar în relațiile de forma (2), (2') și (2'') termenii din membrul drept sînt cunoscuți. Pentru a obține sistemul de ecuații energetice sub forma în afara relațiilor de forma (4), (5') și (5'') apar $r \times s$ restricții de forma :

$$\left.\begin{array}{l} \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \cdots, \sum_{i_k=1}^{p} x_{i_k} \leqslant P_k t^j, \ \cdots \\ \cdots, \sum_{i_k=1}^{q} x_{i_k} \leqslant P_k t^j, \ \cdots \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \end{array}\right\} \begin{array}{l} k=1,\ldots,s \\ k=1,\ldots,s \end{array} \qquad (6)$$

$$j=1,\ldots,r$$

exprimînd limitarea cantității de energie electrică produsă de o centrală, respectiv de un grup de centrale, în funcție de durata de utilizare a puterii disponibile a acestora, în intervalul respectiv.

În relațiile de mai sus :

P — puterea disponibilă a centralei ;

t_k — intervalul de timp în care centrala sau grupul de centrale funcționează în regim energetic ;

x_{i_k} — cantitatea de energie electrică produsă de centrala electrică i_k ;

p — numărul de centrale electrice considerate ;

q — numărul de centrale electrice considerate ;

j — indice care se referă la un sector al curbei de sarcină ;

r — numărul de sectoare în care s-a împărțit curba de sarcină ;

k — indice care se referă la o anumită centrală electrică ;

s — numărul centralelor electrice interconectate, şi s restricţii de forma

$$\left.\begin{array}{c} \cdots\cdots\cdots \\ \sum_{i_k=1}^{p} \sum_{j=1}^{r} x_{i_k}^{j} \leqslant P_k T_k \\ \cdots\cdots\cdots \end{array}\right\} k = 1,\ldots, s \qquad (7)$$

exprimînd limitarea cantităţii de energie produsă de o anumită centrală în cursul unui an, unde T_k este numărul maxim posibil al orelor de utilizare a puterii disponibile.

În acelaşi caz al bilanţului energetic general curent pentru determinarea cheltuielilor anuale minime, pentru centralele electrice reţinem numai cheltuielile variabile care pot fi socotite proporţionale cu cantitatea de energie produsă. Astfel se elimină dificultatea aparentă introdusă de variabilitatea preţului de cost cu cantitatea de energie produsă şi care dă funcţiei C un caracter neliniar aparent.

În cazul bilanţului energetic general de perspectivă, trebuie să avem în prealabil stabilite amplasamentele necesare ale centralelor electrice şi caracteristicile principale pe tipuri de centrale în funcţie de utilajul şi combustibilul folosit. Modelul bilanţului energetic va conţine de data aceasta expresii de forma (4), (5'), (5''), (6) şi (7) în care însă P_k reprezintă o variabilă. Se mai adaugă condiţia :

$$\sum_{k=1}^{s} P_k \leqslant P_{\text{max. sistem}},$$

ce exprimă condiţia acoperirii vîrfului de sarcină. Cheltuielile anuale de calcul introduse de o centrală sînt

$$C_{X,P} = \sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{r} c_i' x_i^j + c'' P + e_n i P, \qquad (8)$$

în care

$X = \sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{r} x_i^j$ — producţia anuală de energie electrică a centralei;

P — puterea disponibilă a centralei electrice;

c' — coeficient de proporţionalitate al cheltuielilor de producţie anuale, proporţionale cu cantitatea de energie produsă;

c'' — coeficient de proporţionalitate al cheltuielilor de producţie anuale, proporţionale cu puterea centralei electrice;

e_n — coeficient normat al eficacităţii economice;

i — investiţia specifică;

i, j, p, r — indici şi numere cu aceeaşi semnificaţie ca în formulele (6) şi (7).

Tot în legătură cu regimul sursei de energie şi al consumatorului, centralele hidroelectrice pot fi privite, în funcţie de natura amenajării, ca dependente de sursa de energie — centralele fluviale sau cele cu lacuri

mici de acumulare, — sau independente de ea — centrale cu lac de acumulare cu posibilități de reglaj anual sau superanual.

5. În concluzie se poate afirma că introducerea regimului de consum și de producere a energiei și purtătorilor de energie, nu produce o modificare a structurii modelului matematic al bilanțului energetic general ci numai o dezvoltare a sa, exprimată prin mărirea numărului de condiții și de variabile.

ВЫРАЖЕНИЕ РЕЖИМА ПОТРЕБЛЕНИЯ И ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ И ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ В УРАВНЕНИЯХ ОБЩЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА

РЕЗЮМЕ

В работе указывается способ описания режима выработки и потребления энергии и энергоносителей, при помощи математической модели общего энергетического баланса. Автор приходит к выводу, что введение этого аспекта развивает математическую модель и не вносит изменений в ее структуру.

BIBLIOGRAFIE

1. T. MICLESCU, *Considerații asupra bilanțului energetic de perspectivă*. St. cerc. energ., *3* (1960).
2. T. MICLESCU, AL. PAP, *Procedee de calcul pentru determinarea bilanțului energetic de perspectivă*, I. *Procedee aproximative*. St. cerc. energ., *2* (1962).
— *Procedee de calcul pentru determinarea bilanțului energetic de perspectivă*. II. *Procedee exacte*. St. cerc. energ., *3* (1962).

CONSECINȚELE ECONOMICE ALE ÎNTRERUPERILOR ELECTRICE ÎN PROCESELE SIDERURGICE

DE

C. GUȚU, I. IORDACHE și A. SOCI

621.311.153.23.003.1 : 669

1. CONSIDERAȚII GENERALE

În lucrarea de față se prezintă un model pentru calculul daunelor provocate de întreruperile electrice în principalele procese siderurgice și se arată rezultatele obținute într-un caz concret, la un mare combinat siderurgic.

În prealabil, autorii au elaborat o lucrare teoretică generală [1] privind structura daunelor, mărimile care descriu acest fenomen și principiul metodei de calcul. Aplicarea acesteia [2], [3] a arătat, după cum era de așteptat, că fiecare proces tehnologic în parte ridică probleme specifice, pe care metoda de principiu nu le putea prevedea. În acest sens, lucrarea de față constituie o dezvoltare și o completare a metodei de principiu. Evident, situațiile concrete sînt atît de diverse încît problema nu se epuizează din punct de vedere metodic nici chiar prin prezentarea unui model special destinat pentru o anumită ramură industrială, de exemplu pentru siderurgie. Totuși, existența unui model ușurează considerabil aplicarea metodei generale în ramura respectivă, oferă date concrete pentru aprecierea daunelor în întreprinderi asemănătoare — încă nestudiate sau aflate în stadiul de proiectare —, precum și elementele necesare pentru sintetizarea ulterioară a unor scheme de calcul mai generale.

Pentru a scurta expunerea, se consideră că metoda de principiu și semnificația componentelor D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 ale daunelor totale se cunoaște [1], [2], [3]. Se reamintește doar că elementul principal al metodei îl constituie determinarea caracteristicei de timp a întreruperilor $\theta_p = f(\theta)$, care reprezintă durata de oprire a producției în funcție de durata întreruperii curentului. Totodată se reproduc din [3] următoarele relații de calcul, la care se face apel în continuare:

$$\left.\begin{aligned} D_3 &= m_3\,\theta_p \\ D_4 &= m_4\,\theta_p \\ D_5 &= m_5\,\theta_p \\ D &= D_1 + D_2 + m\theta_p \end{aligned}\right\} \quad (1) \qquad \left.\begin{aligned} m_3 &= c_a\frac{P}{T} \\ m_4 &= c_s\frac{P}{T} \\ m_5 &= b_n\frac{P}{T} \\ m &= m_3 + m_4 + m_5 \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

în care:

$D_1 \ldots D_5$ — componentele daunelor, lei;
θ_p — durata de oprire a producției, min;
P — producția zilei normale, t;
T — durata zilei de lucru normale, min;
c_a — componenta amortizărilor și cheltuielilor generale în prețul de cost, lei/t;
c_s — componenta salariilor în prețul de cost, lei/t;
b_n — beneficiul net, lei/t.

Pe lîngă daunele în valoare absolută (lei) s-au mai calculat costul kilowattorei nelivrate (lei/kWh), costul minutului de întrerupere (lei/min) și reducerea producției în ziua întreruperii (%), respectiv [1], [2], [3]

$$d = \frac{D}{\Delta E}; \quad \delta = \frac{D}{\theta}; \quad r = \frac{\theta_p}{T}100. \qquad (3)$$

Indicele r oferă o anumită imagine a daunelor conexe. Necesitatea de a-l calcula provine din faptul că activitatea industriei siderurgice se reflectă rapid în activitatea altor industrii de bază ale economiei naționale.

Studiul de față a fost elaborat în ipoteza că nici una din fazele procesului tehnologic, cu excepția furnalelor, nu are alimentare electrică de avarie. Acest lucru va permite proiectanților să aprecieze eficacitatea alimentărilor de avarie pentru fiecare fază în parte.

2. SCHEMA PROCESULUI TEHNOLOGIC

Combinatul siderurgic care a furnizat datele pentru studiul daunelor are o schemă tehnologică clasică, arătată în figura 1.

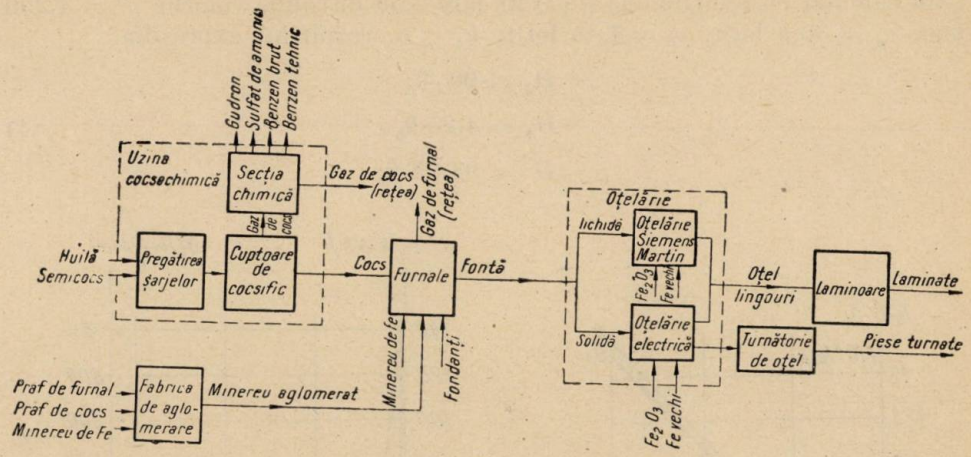


Fig. 1. — Schema tehnologică simplificată a combinatului siderurgic.

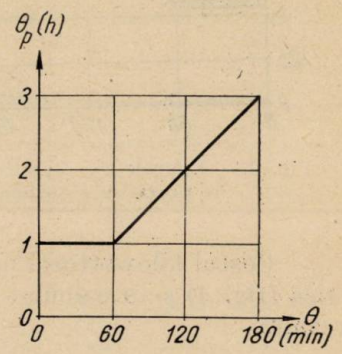


Fig. 2. — Caracteristica de timp a întreruperilor la secția de pregătire a șarjelor.

3. EFECTELE ÎNTRERUPERILOR ELECTRICE LA UZINA COCSO-CHIMICĂ

Uzina cocso-chimică are drept scop principal producerea cocsului metalurgic, necesar elaborării fontei în furnale. Ea cuprinde trei secții principale și anume: secția de pregătire a șarjelor pentru cocsificare, secția cuptoare de cocs și secția chimică.

3.1. *Secția de pregătire a șarjelor pentru cocsificare.* Partea cea mai sensibilă la întreruperi, a secției de pregătire a șarjelor, o formează motoarele sincrone pentru acționarea concasoarelor. O întrerupere oricît de mică a alimentării cu energie electrică duce la oprirea instalației pentru o perioadă de aproximativ o oră, timp necesar pentru deblocarea concasoarelor. Întreruperile mai lungi decît 60 min conduc la opriri avînd durata egală cu durata întreruperii electrice (fig. 2).

Deoarece întreruperile electrice nu provoacă rebuturi sau avarii ale utilajelor, nu se semnalează daune de tip D_1 și D_2. Daunele D_3 și D_4 (fig. 3)

s-au calculat cu relațiile (1) și (2) în care s-au introdus valorile $P = 4\,250$ t/zi, $c_a = 30{,}5$ lei/t, $c_s = 1{,}45$ lei/t, $b_n = 0$, rezultînd expresiile

$$D_3 = 90\ \theta_p,$$
$$D_4 = 4{,}25\ \theta_p, \qquad (4)$$
$$D = 94{,}25\ \theta_p.$$

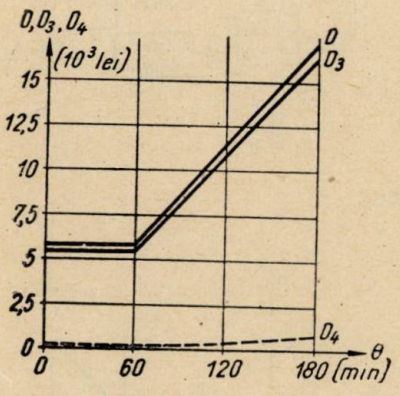


Fig. 3. — Daunele D_3, D_4 și D la secția de pregătire a șarjelor.

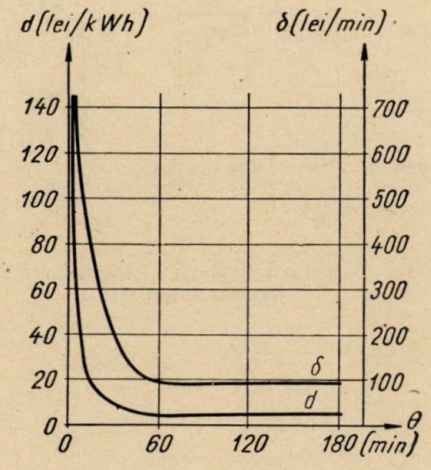


Fig. 4. — Daunele specifice la secția de pregătire a șarjelor.

Costul kilowattorei nelivrate și costul minutului de întrerupere electrică (fig. 4) s-au calculat cu relațiile (3) în care $\Delta E = 20{,}6\ \theta$, de unde rezultă

$$d = 4{,}56\ \frac{\theta_p}{\theta},$$
$$\delta = 94{,}25\ \frac{\theta_p}{\theta}. \qquad (5)$$

3.2. *Secția cuptoare de cocsificare.* În funcționarea cuptoarelor de cocsificare, elementul cel mai periculos din punctul de vedere al întreruperilor electrice este inversarea încălzirii cuptoarelor. Perioada inversării este de 20 min. Se închide mai întîi supapa de gaze de cocs sau de furnal și apoi, cu o întîrziere de 5 min, se deschide supapa de aer. Dacă întreruperea electrică are loc în perioade cînd ambele supape sînt închise, încălzirea cuptorului se oprește. Probabilitatea ca încălzirea să se oprească crește de la 5/25 pînă la 1, atunci cînd durata întreruperii crește de la o valoare infinit mică pînă la 20 min.

Timpul de oprire a producției, corespunzător în medie unei întreruperi de durată θ, va fi

$$\theta_p = \theta\left(0{,}2 + \frac{1}{25}\frac{\theta}{2}\right) \text{ pentru } \theta < 20 \text{ minute},$$
$$\theta_p = 12 + (\theta - 20) \text{ pentru } \theta > 20 \text{ minute}. \tag{6}$$

Avînd în vedere faptul că pentru reluarea producției cuptorul trebuie adus la temperatura de regim, durata de oprire a producției (fig. 5) va fi mai mare decît cea obținută din ecuațiile anterioare și anume cu timpul necesar aducerii cuptorului la temperatura de regim

$$\theta'_p = 1{,}8\theta\left(0{,}2 + \frac{1}{25}\frac{\theta}{2}\right) \text{ pentru } \theta < 20 \text{ minute},$$
$$\theta'_p = 1{,}8\,(\theta - 8) \qquad \text{pentru } \theta > 20 \text{ minute}. \tag{7}$$

S-a considerat că timpul necesar aducerii cuptorului la temperatura de regim este 0,8 θ [5].

Daunele D_1 se datoresc consumurilor suplimentare de energie electrică, gaze de furnal și gaze de cocs pe timpul necesar aducerii cuptorului la temperatura de regim. Cum consumul suplimentar va avea loc numai pe timpul 0,8 θ, daunele D_1 se vor calcula cu relația $D_1 = 0{,}8\ m_1\ \theta$, unde m_1 reprezintă componenta de energie electrică și gaze în prețul de producție. Pentru $m_1 = 5$ lei/min, $D_1 = 4\ \theta$. Componentele D_3, D_4, D — ținînd seama de faptul că pentru o baterie de cuptoare de cocsificare $P = 610$ t/zi, $c_a = 42$ lei/t, $c_s = 5{,}10$ lei/t, $b_n = 0$, — s-au calculat cu relațiile

$$D_3 = 17{,}7\ \theta_p,$$
$$D_4 = 2{,}15\ \theta_p, \tag{8}$$
$$D = 19{,}85\ \theta_p + 4\ \theta$$

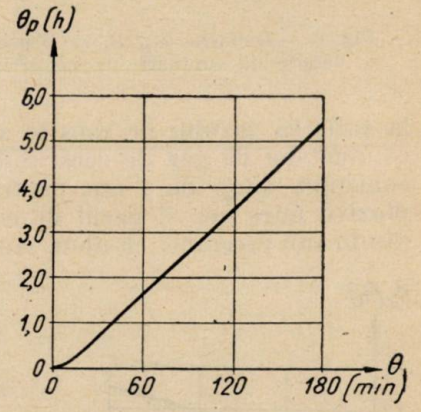


Fig. 5. — Caracteristica de timp a întreruperilor la secția de cuptoare de cocsificare.

și s-au reprezentat grafic în figura 6.

Pentru costul kilowattorei nelivrate și pentru costul minutului de întrerupere electrică (fig. 7), prin analogie cu (5), rezultă

$$d = \frac{19{,}85\ \theta_p + 4\theta}{2{,}08\ \theta},$$
$$\delta = \frac{19{,}85\ \theta_p + 4\theta}{\theta}. \tag{9}$$

3.3. *Secția chimică.* În cadrul secției chimice, perturbațiile cele mai importante le provoacă instalația de exhaustoare, acționate de regulă cu turbopompe. În cazul întreruperii alimentării cu energie electrică, exhaustoarele mai pot funcționa maximum 15 minute, după care se trece

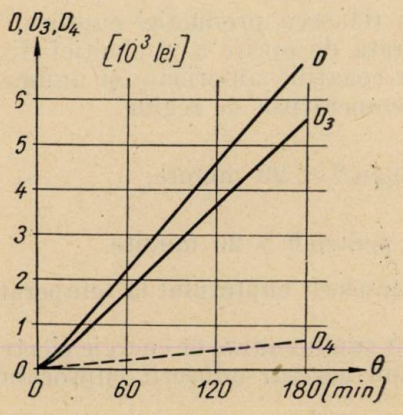


Fig. 6. — Daunele D_3, D_4 și D pentru o baterie de cuptoare de cocsificare.

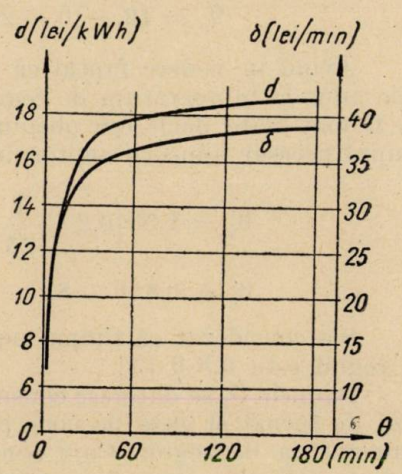


Fig. 7. — Daunele specifice pentru o baterie de cuptoare de cocsificare.

la suflarea gazului de cocs în atmosferă și la suflarea cu abur a tuturor conductelor de gaz de cocs. Suflarea conductelor cu abur se face în mod continuu, timp de 4 ore, pentru a împiedica formarea de amestecuri explozive între aer și gazul de cocs. Pînă la apariția tensiunii, conductele rămîn sub presiune, cu abur. Această situație duce la oprirea întregii secții chimice, care poate reveni la starea de regim normal abia după 10 ore de la apariția tensiunii (fig. 8).

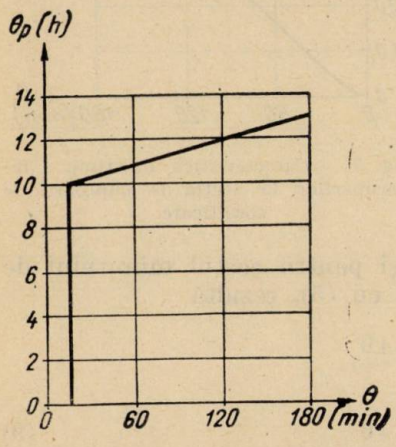


Fig. 8. — Caracteristica de timp a întreruperilor la secția chimică.

Daunele D_1 au loc datorită consumurilor suplimentare de energie electrică, abur și apă industrială pe perioada opririi și repornirii instalației. Ele apar după scurgerea timpului de 15 min de la producerea întreruperii electrice și rămîn practic constante

$$D_1 = D_1^{ee} + D_1^{ab} + D_1^{ai} + D_1^{ac}, \quad (10)$$

unde

D_1^{ee} — daunele provocate de consumul suplimentar de energie electrică;

D_1^{ab} — daunele provocate de consumul suplimentar de abur;

D_1^{ai} — daunele provocate de consumul suplimentar de apă industrială;

D_1^{gc} — daunele provocate de evacuarea gazului de cocs în atmosferă.

În cazul studiat:

$$D_1^{ee} = 600 \times 0{,}35 \times 10 = 2\,100 \text{ lei}, \quad D_1^{ab} = (40 \times 4 + 30 \times 10)\ 24 = 11\,000 \text{ lei}, \quad D_1^{ai} = 110 \times 10 \times 0{,}142 = 156 \text{ lei}, \quad D_1^{gc} = 60\,000 \times 5 \times 0{,}053 = 15\,850 \text{ lei}, \quad D_1 = 29\,100 \text{ lei}.$$

În ceea ce privește daunele D_3, D_4 și D_5, dependente de timpul de oprire a producției, expresiile lor se complică față de (1) și (2), deoarece coeficienții m_3, m_4 și m_5 vor fi formați din sume, corespunzînd diferitelor produse ale secției. Astfel, folosind indicii g, sa, bb și bt pentru gudron, sulfat de amonium, benzen brut și respectiv benzen tehnic și ținînd seama de valorile

$$\begin{aligned}
&m_3^g = 3{,}03, && m_4^g = 0{,}63, && m_5^g = 41 \text{ lei/min},\\
&m_3^{sa} = 8{,}10, && m_4^{sa} = 0{,}87, && m_5^{sa} = 2{,}84 \text{ lei/min},\\
&m_3^{bb} = 6{,}20, && m_4^{bb} = 0{,}28, && m_5^{bb} = 36{,}5 \text{ lei/min},\\
&m_3^{bt} = 5{,}80, && m_4^{bt} = 0{,}77, && m_5^{bt} = 0,\\
&m_3 = 23{,}13, && m_4 = 2{,}55, && m_5 = 80{,}34 \text{ lei/min},
\end{aligned}$$

rezultă

$$\begin{aligned}
D_3 &= 23{,}13\,\theta_p\\
D_4 &= 2{,}55\,\theta_p\\
D_5 &= 80{,}34\,\theta_p\\
D &= 29\,100 + 106{,}02\,\theta_p.
\end{aligned} \tag{11}$$

Caracteristicile $D_3(\theta)$, $D_5(\theta)$ și $D(\theta)$ s-au reprezentat în figura 9.

Pentru costul kilowattorei nelivrate și pentru costul minutului de întrerupere electrică (fig. 10) s-au obținut relațiile

$$\begin{aligned}
d &= \frac{29\,100 + 106{,}02\,\theta_p}{10\,\theta}\\
\delta &= \frac{29100 + 106{,}02\,\theta_p}{\theta}.
\end{aligned} \tag{12}$$

3.4. *Uzina cocsochimică.* Între secția pentru pregătirea șarjelor și cuptoarele de cocsificare există permanent o rezervă de șarje care poate asigura funcționarea normală a cuptoarelor pentru cel puțin un schimb. De aceea, la reapariția tensiunii, cele două secții își pot relua activitatea, independent una de alta.

Între secția chimică și cea a cuptoarelor de cocsificare există o legătură tehnologică rigidă, întrucît secția chimică prelucrează produsele secundare rezultate din procesul de cocsificare (conținute în gazul de cocs).

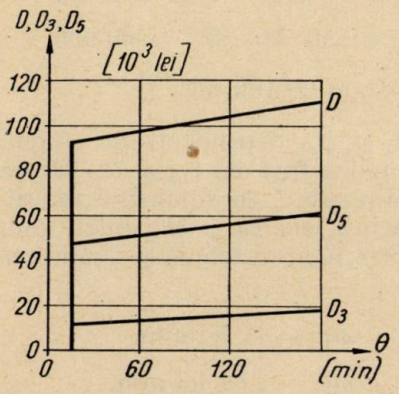


Fig. 9. — Daunele D_3, D_5 și D pentru secția chimică.

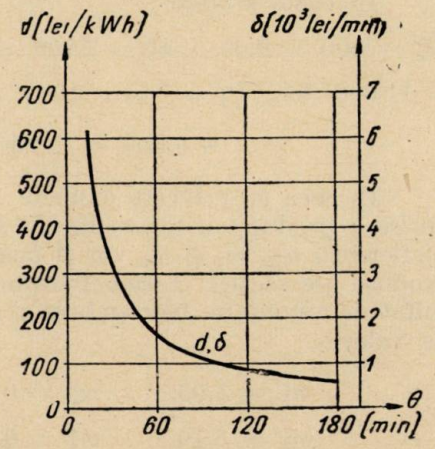


Fig. 10. — Daunele specifice la secția chimică.

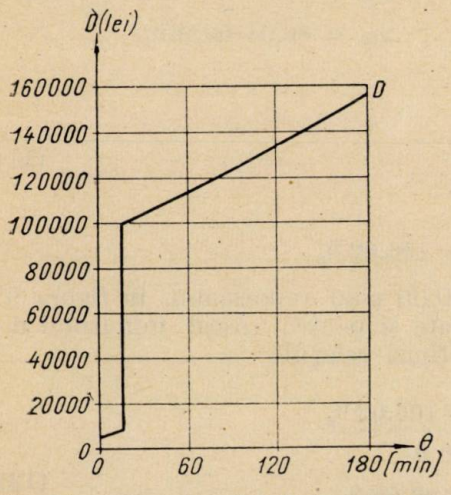


Fig. 11. — Daunele totale D la uzina cocsochimică.

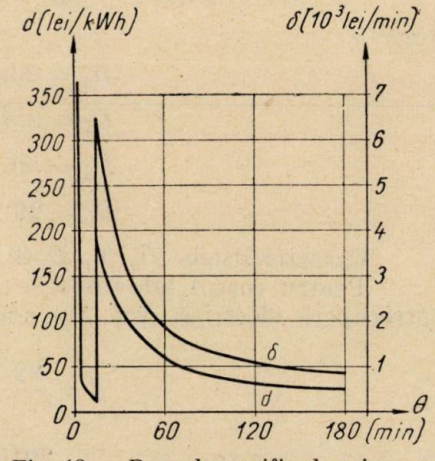


Fig. 12. — Daunele specifice la uzina cocsochimică.

Dar avînd în vedere faptul că secția de cuptoare poate funcționa chiar cînd secția chimică nu lucrează (suflă gazul de cocs în atmosferă) și că secția chimică are o caracteristică de timp a întreruperilor electrice mai ridicată decît a cuptoarelor de cocsificare (este mai lentă) rezultă că și în cazul acestor două secții reluarea procesului de producție se face în mod inde-

pendent. De aici urmează că daunele totale ale uzinei cocsochimice (fig. 11) se obțin prin însumarea daunelor totale, D, ale celor trei secții calculate cu (4), (8) și (11). Se va ține seama de faptul că în cazul studiat există patru baterii de cuptoare de cocsificare.

Costul kilowattorei nelivrate și costul minutului de întrerupere electrică (fig. 12) s-au calculat prin raportarea daunelor totale, calculate ca mai sus, la energia electrică nelivrată și respectiv la durata de întrerupere a energiei electrice.

4. EFECTELE ÎNTRERUPERILOR ELECTRICE LA ELABORAREA FONTEI

Furnalele sînt instalații foarte pretențioase din punctul de vedere al alimentării cu energie electrică, anumite elemente ale lor, cum ar fi suflantele de aer și stațiile de pompare a apei de răcire nesuportînd nici cele mai mici întreruperi electrice [6].

O întrerupere oricît de mică, atît a suflantelor cît și a stațiilor de pompe conduce la explozii care pot provoca distrugerea parțială sau totală a furnalului. Pentru acest motiv, siguranța în alimentarea cu energie electrică a instalațiilor amintite mai sus, trebuie să fie practic de 100%. Celelalte instalații ale furnalelor nu au această asigurare și în alimentarea lor se pot ivi întreruperi accidentale.

Într-o asemenea situație, elementul care ar putea perturba buna funcționare a furnalului este instalația de încărcare, a cărei acționare este făcută cu motoare electrice. Cazul cel mai defavorabil are loc atunci cînd instalația este surprinsă cu clopotul mare deschis. În acest caz, gazul de furnal iese afară, se aprinde și într-un timp de aproximativ 30 min (dacă întreruperea electrică durează această perioadă) distruge instalația de încărcare, fapt care conduce la oprirea producției pe o perioadă de 5 zile. Avînd în vedere faptul că se fac 6 deschideri pe oră și că de fiecare dată clopotul mare rămîne deschis 2 min, rezultă că probabilitatea ca acest clopot să fie surprins în stare deschisă este foarte mică și anume $p = 0{,}2$, rămînînd constantă pe tot timpul întreruperii electrice.

Dacă, în momentul întreruperii electrice, clopotul mare este închis, producția furnalului va scădea, deoarece acesta nu mai poate fi încărcat. Probabilitatea de a surprinde furnalul în această situație este de 0,8. Așadar, întreruperea producției începe cu probabilitatea 0,2, care crește pînă la o valoare egală cu unitatea cînd durata întreruperii electrice a atins valoarea de 8 min.

Pentru calculul daunelor s-a folosit caracteristica de timp medie, dedusă pe baza caracteristicilor de timp ale celor două cazuri posibile (fig. 13).

Componentele D_3, D_4, D (fig. 14) și daunele specifice (fig. 15) se calculează fără dificultăți cu relațiile cunoscute. De exemplu, pentru un

furnal de 700 m³, ținînd seama de faptul că $P = 860$ t/zi, $c_a = 79{,}63$ lei/t, $c_e = 5{,}11$ lei/t, se obține

$$\left.\begin{aligned} D_3 &= 47{,}5\,\theta_p \\ D_4 &= 3\,\theta_p \\ D &= 50{,}5\,\theta_p \end{aligned}\right\} \quad (13) \qquad \text{și respectiv} \qquad \left.\begin{aligned} d &= \frac{D}{9{,}0\,\theta} \\ \delta &= \frac{D}{\theta} \end{aligned}\right\} \quad (14)$$

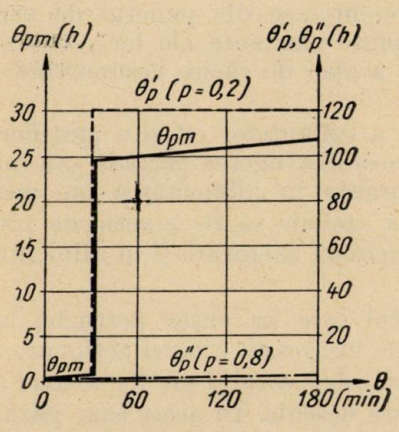


Fig. 13. — Caracteristica de timp a întreruperilor pentru un furnal.

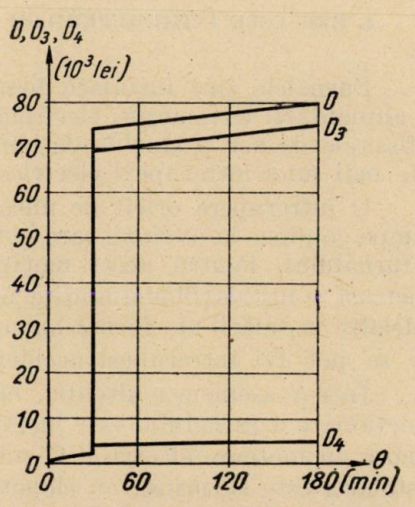


Fig. 14. — Daunele D_3, D_4, D la un furnal de 700 m³.

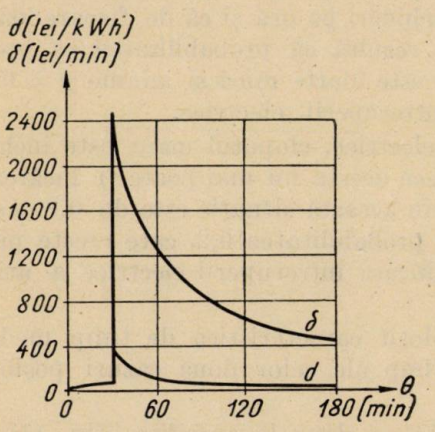


Fig. 15. — Daunele specifice la un furnal de 700 m³.

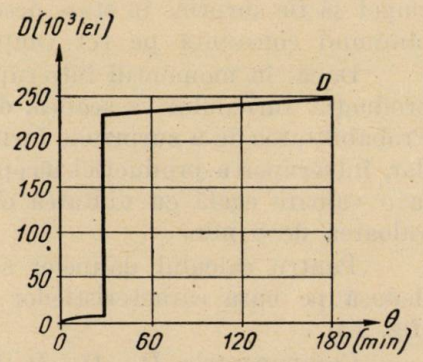


Fig. 16. — Daunele totale la sectorul de furnale al combinatului.

La calculul daunelor totale nu s-a ținut seama de daunele D_1 (consumuri suplimentare de energie electrică și combustibil), ele avînd o pondere extrem de mică față de componentele D_3 și D_4.

La furnale de capacități mai mari caracteristica daunelor are aceeași aliură, dar valorile sînt mai moderate.

Pentru sectorul de furnale al combinatului studiat, care are 6 furnale, ținînd seama și de fabrica de aglomerare (la care daunele sînt foarte mici), se obțin rezultatele din figurile 16 și 17.

5. EFECTELE ÎNTRERUPERILOR ELECTRICE LA ELABORAREA OȚELULUI

Autorii au studiat *) daunele care au loc la cuptoare Siemens-Martin și la cuptoare electrice de diferite capacități. Din lipsă de spațiu, se reproduc aici doar rezultatele finale. În figurile 18 și 19 se arată daunele totale, respectiv daunele specifice la oțelăria Siemens-Martin, iar în figurile 20 și 21 — la oțelăria electrică.

6. EFECTELE ÎNTRERUPERILOR ELECTRICE ASUPRA PROCESULUI DE LAMINARE

De regulă, combinatele siderurgice moderne au mai multe secții de laminare. Calculul daunelor se exemplifică pe un laminor de 800 mm, tip duo reversibil, destinat pentru fabricarea de profile; capacitatea de producție medie este de 25 000 t/lună.

Procesul de laminare are două faze principale: încălzirea lingourilor în cuptoare și laminarea propriu-zisă (inclusiv finisarea). Pentru a stabili caracteristica de timp a întregului proces este necesar, în prealabil, să se determine caracteristicile fazelor componente.

Încălzirea lingourilor are loc în cuptoarele adînci sau în cuptorul cu propulsie. În această fază a procesului tehnologic, efectul principal al întreruperii curentului electric constă în oprirea ventilatoarelor care asigură aerul necesar arderii. O dată cu oprirea ventilatoarelor, arderea se reduce, cuptoarele se răcesc, iar temperatura lingourilor scade atingînd valori la care procesul tehnologic normal nu poate continua.

După revenirea tensiunii, pentru a readuce lingourile la temperatura prescrisă (1 200—1 220°C), este necesar un anumit timp. Durata pauzei totale se poate calcula cu relația

$$\theta_p = \theta + \int_{\tau_i}^{1\,220} \frac{C\,\mathrm{d}\tau}{Q - A\,(\tau - \tau_0)}, \qquad (15)$$

în care θ_p — intervalul de timp cuprins între momentul întreruperii curentului și momentul revenirii cuptorului la temperatura de regim;

θ — durata întreruperii curentului;

*) C. Guțu, I. Iordache, A. Soci, *Calculul daunelor provocate de întreruperile în alimentarea cu energie electrică a combinatelor siderurgice*. Institutul de energetică al Academiei R.P.R. (protocol), 1962.

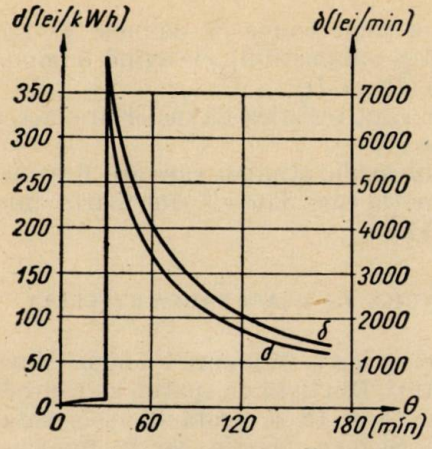


Fig. 17

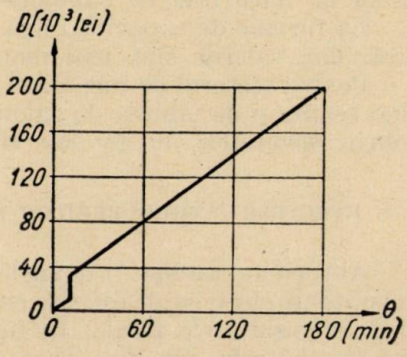


Fig. 18

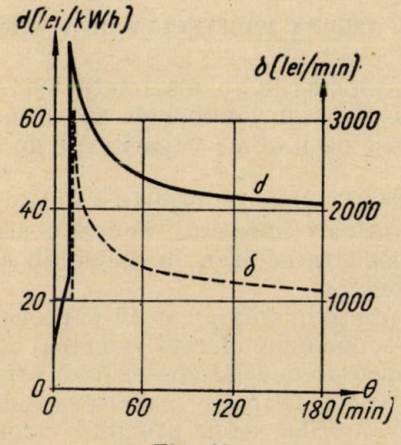


Fig. 19

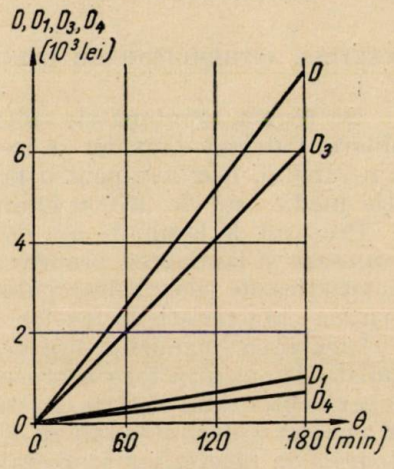


Fig. 20

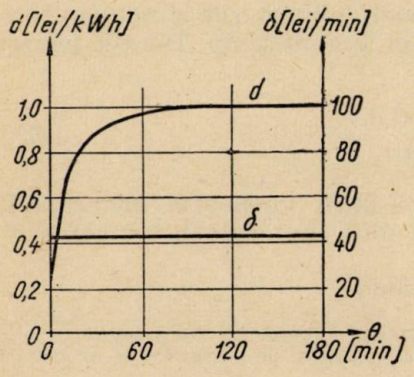


Fig. 21

Fig. 17. — Daunele specifice la sectorul de furnale al combinatului.

Fig. 18. — Daunele totale la oțelăria Siemens-Martin.

Fig. 19. — Daunele specifice la oțelăria Siemens-Martin.

Fig. 20. — Daunele totale la oțelăria electrică.

Fig. 21. — Daunele specifice la oțelăria electrică.

τ — temperatura cuptorului;

τ_i — valoarea inițială a temperaturii (valoarea de la care reîncepe arderea normală după revenirea tensiunii);

τ_0 — temperatura mediului ambiant;

C — capacitatea calorică a cuptorului;

Q — cantitatea de căldură în unitatea de timp, introdusă în cuptor;

A — cantitatea de căldură, pe unitatea de timp și de temperatură, cedată mediului ambiant.

Valoarea τ_i se determină din ecuația răcirii, cunoscînd, în afara ele-

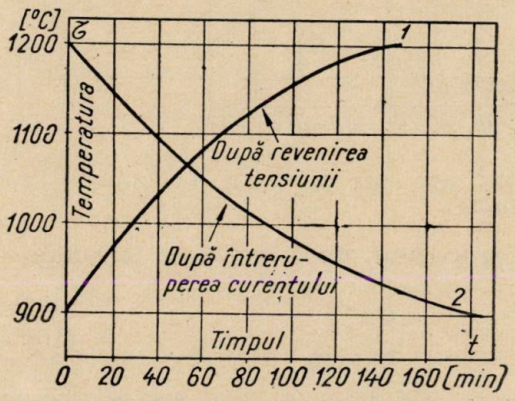


Fig. 22. — Curbele de răcire și încălzire a cuptorului.

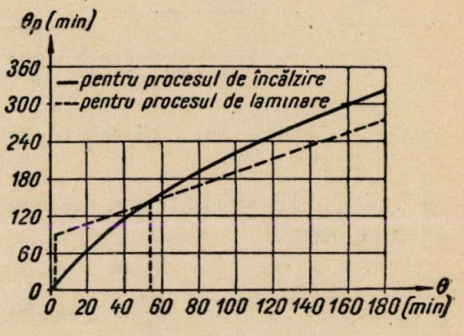


Fig. 23. — Caracteristica întreruperilor pentru procesul de încălzire a lingourilor și pentru procesul de laminare.

mentelor de mai sus, constanta de timp termică a cuptorului.

Din cauza unor condiții locale, integrala din relația (15) nu s-a rezolvat pe cale analitică, ci grafic. În acest scop, s-au folosit curbele de variație a temperaturii cuptorului în intervalul $t = 0 \ldots \theta$ și după revenirea tensiunii (fig. 22). Caracteristica de timp a întreruperilor, pentru procesul de încălzire a lingourilor în cuptoare, determinată cu relația (15) și cu ajutorul figurii 22, se reprezintă în figura 23.

Se remarcă faptul că timpul necesar pentru manevre este neglijabil în raport cu pauza impusă de condițiile de regim termic. Din acest motiv, pentru determinarea caracteristicei de timp este suficient să se țină seama de relația (15).

A doua fază a procesului este laminarea propriu-zisă. Această operație este un proces discontinuu, care se caracterizează printr-un anumit număr de treceri ale lingoului prin caja degrosisoare, apoi prin cajele finisoare. Succesiunea și durata trecerilor se arată în diagrama Adametki (fig. 24). De obicei, diagrama Adametki se prezintă sub formă desfășurată [13]. Pentru scopurile studiului de față, ea a fost raportată la timpul de succesiune a lingourilor (perioada procesului). În figura 24, prin linii groase s-au marcat intervalele de timp în care barele trec printre cilindri;

celelalte intervale reprezintă pauze (barele stau pe o platformă sau se deplasează de la o platformă la alta).

În momentul întreruperii, barele se pot afla în una din următoarele două situații : pe platformă (interval de pauză), sau între cilindri (interval

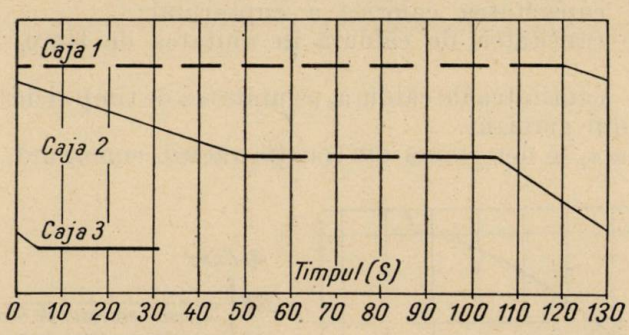


Fig. 24. — Diagrama Adametki (raportată la timpul de succesiune).

de lucru). În primul caz, reluarea procesului, după revenirea tensiunii, se face rapid

$$\begin{aligned} \theta_p &= \theta + 5, && \theta \leqslant 15, \\ \theta_p &= \theta + 10, && \theta > 15. \end{aligned} \tag{16}$$

În al doilea caz, dacă întreruperea se prelungește peste 2 min atunci sînt necesare demontări parțiale și manevre complicate (în medie 2 ore) pentru scoaterea barelor răcite dintre cilindri

$$\begin{aligned} \theta_p &= \theta + 5, && \theta \leqslant 2, \\ \theta_p &= \theta + 120, && \theta > 2. \end{aligned} \tag{17}$$

Ecuațiile (16) și (17) se pot utiliza numai dacă se cunoaște intervalul în care s-a produs întreruperea (pauză sau lucru). Întrucît acest fapt este de regulă necunoscut, apare necesitatea unei caracteristici de timp, independentă de momentul întreruperii. O asemenea caracteristică *medie* se poate determina dacă se ține seama de faptul că momentul întreruperii este un eveniment statistic, avînd șanse egale în fața fiecărui interval de durată egală.

Fie (figura 24) :

i — numărul de ordine al cajei;
j — numărul de ordine al unui interval de lucru (de trecere);
k — numărul de ordine al unui interval de pauză;
a_{ij} — durata trecerii j prin caja i;
b_{ik} — durata pauzei k pe platforma cajei i;
p_{ij} — probabilitatea evenimentului „întreruperea se va produce în intervalul de lucru a_{ij}";
q_{ik} — probabilitatea evenimentului „întreruperea se va produce în intervalul de pauză b_{ik}";

p_i — probabilitatea evenimentului „întreruperea se va produce în unul din intervalele de lucru ale cajei i";

q_i — probabilitatea evenimentului „întreruperea se va produce în unul din intervalele de pauză ale cajei i";

p — probabilitatea evenimentului „întreruperea se va produce cînd cel puțin o bară se va afla în trecere (în interval de lucru)";

q — probabilitatea evenimentului „întreruperea se va produce cînd toate barele se vor afla în intervalul de pauză".

Din diagrame Adamețki (fig. 24) se cunosc duratele a_{ij} și b_{ik}. Evident,

$$p_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum\limits_j a_{ij} + \sum\limits_k b_{ik}}, \qquad q_{ik} = \frac{b_{ik}}{\sum\limits_j a_{ij} + \sum\limits_k b_{ik}}. \tag{18}$$

Aplicînd teorema adunării probabilităților, rezultă

$$p_i = \frac{\sum\limits_j a_{ij}}{\sum\limits_j a_{ij} + \sum\limits_k b_{ik}}, \qquad q_i = \frac{\sum\limits_k b_{ik}}{\sum\limits_j a_{ij} + \sum\limits_k b_{ik}}. \tag{19}$$

Evident,

$$p_i + q_i = 1$$

În cazul studiat, cajele lucrează în paralel, de aceea, la un moment dat, așa cum rezultă și din figura 24 ele pot fi toate libere, toate ocupate, una liberă, celelalte ocupate etc. În consecință (pentru cazul $i = 3$)

$$p = p_1q_2q_3 + q_1p_2q_3 + q_1q_2p_3 + p_1p_2q_3 + p_1q_2p_3 + q_1p_2p_3 + p_1p_2p_3 = 1 - q_1q_2q_3, \tag{20}$$

$q = q_1q_2q_3 = 1 - p.$

Folosind relațiile deduse și valorile care rezultă din diagrama Adamețki (fig. 24), s-a obținut

$$\begin{aligned} p_1 &= 0{,}55, \quad q_1 = 0{,}45, \\ p_2 &= 0{,}33, \quad q_2 = 0{,}67, \\ p_3 &= 0{,}20, \quad q_3 = 0{,}80, \\ p &= 0{,}75, \quad q = 0{,}25. \end{aligned} \tag{21}$$

Ținînd seama de faptul că probabilitatea p afectează ecuația (17) iar probabilitatea q — ecuația (16), se poate calcula, pentru faza de laminare, o caracteristică de timp medie, independentă de momentul întreruperii. Efectuînd calculele respective s-a obținut

$$\begin{aligned} \theta_p &= \theta + 5 && \theta \leqslant 2, \\ \theta_p &= \theta + 91{,}25 && 2 < \theta \leqslant 15, \\ \theta_p &= \theta + 92{,}50 && \theta > 15. \end{aligned} \tag{22}$$

Caracteristica obținută este reprezentată (punctat) în figura 23.

Cunoscînd caracteristicile de timp ale celor două faze componente (fig. 23) se poate determina caracteristica întregului proces (a secției în ansamblu). În acest scop, se va ține seama de faptul că, deși din punct de vedere tehnologic, cele două faze sînt în serie, totuși practic toate operațiile de revenire la regimul normal se efectuează în paralel. În consecință, durata de oprire a secției, pentru fiecare θ, va fi reprezentată de cea mai mare dintre cele două valori θ_p care se pot citi în figura 23. Cu alte cuvinte, caracteristica de timp a secției de laminare este reprezentată de ecuațiile

$$\begin{aligned} \theta_p &= \theta + 5, && \theta \leqslant 2, \\ \theta_p &= \theta + 91{,}25, && 2 < \theta \leqslant 54, \\ \theta_p &= \theta + \int_{\tau_i}^{1220} \frac{C\,\mathrm{d}\tau}{Q - A(\tau - \tau_0)} && \theta > 54. \end{aligned} \tag{23}$$

După cum au arătat calculele efectuate, aceeași caracteristică este valabilă și pentru alte două secții de laminare (laminorul de 1 000 mm și laminorul de 650 mm).

Dacă procesul tehnologic este condus corect, atunci întreruperile de curent nu strică instalațiile ($D_2 = 0$). În schimb, apar rebuturi (D_1') și consumuri suplimentare de combustibil, energie electrică și materiale auxiliare (D_1'').

Pentru D_1' s-au găsit următoarele valori (în lei) :

$$D_1' = \begin{cases} 0 & \theta \leqslant 2, \\ 1\,650 & \theta > 2, \end{cases} \tag{24}$$

valoarea $D_1' = 1\,650$ reprezintă costul prelucrării barelor surprinse pe platforma de laminare de o întrerupere mai mare decît 2 min (materialul nu se pierde, întrucît barele se retopesc). Ea este o medie statistică ce ține seama de probabilitățile ca pe platformă să existe, la un moment dat, un anumit număr de bare.

Dintre toate consumurile suplimentare, singurul mai important și care se poate calcula cu suficientă precizie, este consumul suplimentar

de combustibil necesar pentru readucerea cuptoarelor la temperatura normală.

$$D_1'' = m_1 \theta_p \tag{25}$$

unde $m_1 = 9$ lei/min reprezintă costul consumului mediu de combustibil în unitatea de timp.

Pentru componentele D_3, D_4 şi D_5, ţinînd seama (1), (2) şi de valorile $c_a = 80$ lei/t, $c_s = 13$ lei/t, $b_n = 6\%$, $P = 25\,000$ t/lună, s-au dedus următoarele relaţii de calcul :

$$\begin{aligned} D_3 &= 48{,}0\ \theta_p, \\ D_4 &= 7{,}8\ \theta_p, \\ D_5 &= 48{,}0\ \theta_p. \end{aligned} \tag{26}$$

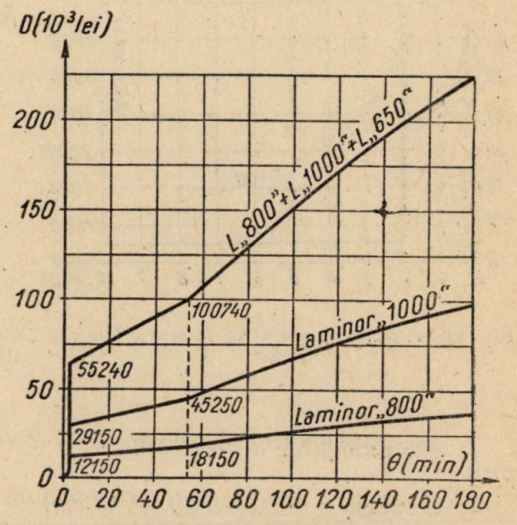


Fig. 25. — Daunele totale la secţiile de laminare.

Dauna totală (suma componentelor $D_1 \ldots D_5$) se reprezintă în figura 25, atît pentru laminorul de 800 mm, cît şi pentru alte două unităţi (laminorul de „1000" şi laminorul de „650").

Se remarcă faptul că dauna totală are valori moderate în raport cu valorile găsite în alte industrii [3]. Acest lucru se explică prin faptul că în cazul de faţă nu se constată pierderi de materie primă şi stricarea utilajului.

Daunele specifice s-au determinat cu relaţiile (3) şi se prezintă în figurile 26 şi 27.

În figura 26, pentru reprezentarea timpului s-a utilizat intenţionat o scară mare. De reţinut faptul că zona timpilor mai mici decît 2 min are o precizie mică şi trebuie utilizată cu precauţie. De altfel, cronometrarea unor întreruperi atît de scurte este ea însăşi supusă multor erori.

Mai important este faptul că costul kilowattorei nelivrate se stabilizează destul de repede la o valoare practic constantă, care nu diferă de la o secţie de laminare la alta (deşi procesele tehnologice, capacitatea de producţie şi înzestrarea electrică diferă).

Ca şi în alte cazuri [3], la determinarea indicilor specifici dificultatea cea mai mare s-a întîmplat la calculul energiei nelivrate. În acest scop s-au folosit următoarele relaţii :

$$\Delta E = \begin{cases} N\theta & \theta \leqslant 2, \\ N'\theta + (N - N')(\theta_p - \theta_d) & \theta > 2, \end{cases} \tag{27}$$

în care N — reprezintă sarcina medie a secţiei ;

N' — sarcina mecanismelor care intră în funcție imediat după revenirea tensiunii (ventilatoarele cuptoarelor, o parte din podurile rulante etc.);

θ_d — timpul necesar pentru demararea mecanismelor mari (de ex. grupurile Ildner), care reprezintă consumatorii principali.

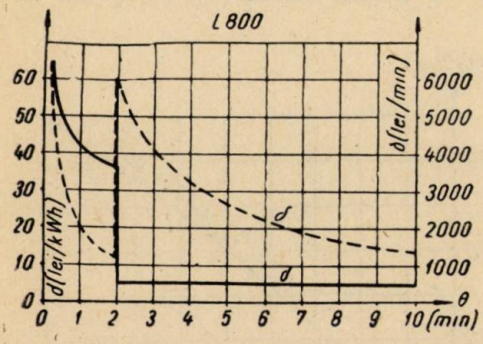


Fig. 26.— Daunele specifice la secția laminor „800".

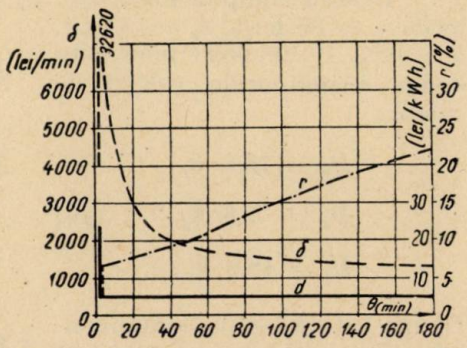


Fig. 27. — Daunele specifice pe ansamblul secțiilor de laminare (laminor 800, laminor 1 000, laminor 650).

În cazul secției studiate, $N = 2\,000$ kW, $N' = 250$ kW, $\theta_d = 5 - 7$ min.

Indicele r (reducerea procentuală a producției în ziua întreruperii) poate servi ca bază de apreciere a daunelor conexe (efectul întreruperilor electrice din sectorul de laminare asupra altor sectoare ale economiei naționale). Metoda aplicată nu ține seama de acest efect care, din motive evidente, în cazul de față are o importanță mare.

7. EFECTELE ÎNTRERUPERILOR ASUPRA COMBINATULUI SIDERURGIC

Deoarece pe duratele obișnuite ale întreruperilor electrice (maximum 2—3 ore) secțiile combinatului pot lucra independent una de alta, daunele pe întregul combinat siderurgic se deduc prin însumarea efectelor economice constatate la secțiile componente. Daunele totale, pentru întregul combinat siderurgic analizat, se reprezintă grafic în figura 28.

Se constată din figura 28 că alura caracteristicii $D(\theta)$ este foarte accidentată în domeniul $0 < \theta < 54$ min, în care prezintă salturi pentru valorile critice ale lui θ pentru diverse secții ($\theta = 2$ min, 10 min, 15 min, 30 min, 45 min). După $\theta = 54$ min, $D(\theta)$ crește proporțional cu θ ajungînd, în dreptul lui $\theta = 180$ min, la valoarea de 840 300 lei.

Costul kilowattorei nelivrate (fig. 29), atinge valoarea maximă în dreptul lui $\theta = 30$ min ($d = 19{,}16$ lei/kWh), apoi scade treptat pînă la 9,30 lei/kWh ($\theta = 180$ min).

Costul minutului de întrerupere electrică scade prin salturi de la valoarea maximă de 36 760 lei/min (la $\theta = 2$ min), pînă la valoarea de 4 668 lei/min (la $\theta = 180$ min).

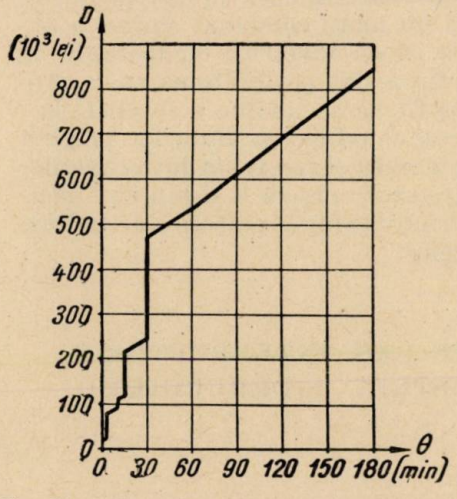


Fig. 28. — Daunele totale pentru întregul combinat siderurgic.

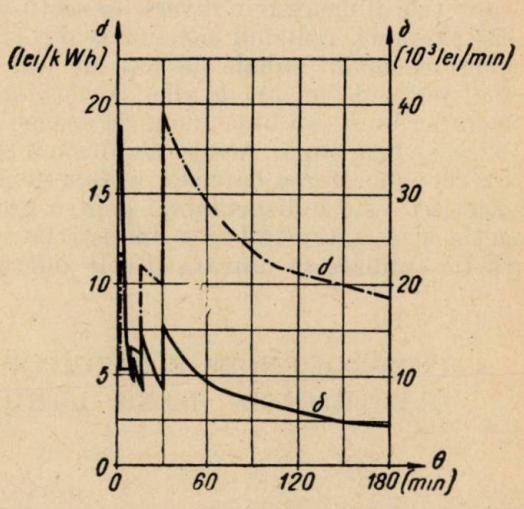


Fig. 29. — Daunele specifice pentru un combinat siderurgic.

8. CONCLUZII

1. Studiul daunelor arată, pe bază de date cantitative, că procesele siderurgice sînt foarte sensibile la întreruperea alimentării cu energie electrică. Daunele cele mai mari se constată la secțiile de furnale și laminoare, urmate apoi de oțelăriile Siemens-Martin și de uzina cocsochimică.

2. În cazul unui combinat siderurgic, daunele totale au o creștere în trepte, salturile corespunzînd timpilor critici de întrerupere electrică a secțiilor. Costul kilowattorei nelivrate variază între 19,16 lei/kWh și 9,3 lei/kWh, trecînd și printr-un minim de 5 lei/kWh. Costul minutului de întrerupere electrică variază între 36 760 lei/min și 4 668 lei/min. Și în cazul proceselor siderurgice se constată că valorile acestor doi indici specifici tind să se stabilizeze (fig. 29), cu observația că ele pot fi considerate stabile de-abia la întreruperi foarte lungi (peste 2 ore).

3. În raport cu valoarea producției combinatelor siderurgice, valoarea daunelor este relativ mică. Acest lucru se explică prin faptul că întreruperile electrice nu conduc decît rareori la pierderi de materie primă. Ori materia primă deține o pondere de peste 90% în prețul de cost al oțelului. Imaginea este însă completată de indicele r de reducere procentuală a producției în ziua întreruperii (fig. 27). Acest indice, calculat pentru secția finală, arată că o întrerupere de 2 min provoacă o scădere de 6,9% a producției, iar o întrerupere de 180 min o scădere de 22%.

4. După părerea autorilor, studiile de daune interesează în egală măsură atît marile sisteme energetice cît și marile întreprinderi industriale. În primul caz, ele vor permite optimizarea siguranței de alimentare a principalelor noduri ale sistemului, iar în al doilea caz — optimizarea siguranței de alimentare a diverselor secții și instalații din cadrul întreprinderii. De exemplu, aplicînd concluziile din [3], un mare combinat chimic a obținut economii anuale de sute de mii de lei cu investiții recuperabile în mai puțin de un an de zile. Același studiu a dat posibilitatea ca la proiectarea unui combinat nou, de același profil, să se adopte o schemă electrică și mai bună. Aceste rezultate întăresc convingerea autorilor potrivit căreia cunoașterea daunelor în funcție de durata și frecvența întreruperilor electrice este indispensabilă pentru proiectarea corectă a sistemului energetic și a întreprinderilor industriale. Printre primele procese care trebuie să fie studiate se numără și cele siderurgice.

CONSÉQUENCES ÉCONOMIQUES DES INTERRUPTIONS ÉLECTRIQUES DANS L'INDUSTRIE SIDÉRURGIQUE

RÉSUMÉ

Les auteurs ont étudié les conséquences des interruptions électriques de diverses durées dans les processus et les installations sidérurgiques suivants : la cokerie, l'élaboration de la fonte, l'élaboration de l'acier et le laminage à chaud de l'acier. L'étude effectuée leur a permis de réaliser un modèle pouvant servir au calcul des dommages causés par les interruptions électriques dans les combinats sidérurgiques. Outre la description de ce modèle, le présent travail fournit les résultats obtenus dans un cas concret, dans un grand combinat sidérurgique. Ils donnent les relations de calcul et représentent les caractéristiques de temps, les dommages totaux et les dommages spécifiques en fonction de la durée de l'interruption électrique. Pour offrir une image plus complète, ils ont calculé, outre le coût du kilowatt-heure non fourni et de la minute d'interruption, la diminution en pour-cent de la production dans la zone de l'interruption. Ce dernier indice sert de base pour estimer les dommages connexes.

Afin d'abréger la présentation, les auteurs ont considéré que leur méthode théorique pour l'étude des dommages [1], antérieurement élaborée, est connue.

BIBLIOGRAFIE

1. C. GUȚU, M. PETCU, A. SOCI, *Determinarea daunelor provocate de întreruperea alimentării cu energie electrică*. St. cerc. energ., **XI**, *4* (1961).
2. — *Daune provocate de întreruperea alimentării cu energie electrică la fabricarea mătăsii-viscoză*. St. cerc. energ., **XII**, *1* (1962).

3. C. GUȚU, M. PETCU, A. SOCI, *Daunele provocate de întreruperile electrice la fabricarea fibrelor sintetice poliamidice.* St. cerc. energ., **XII**, *2* (1962).
4. I. BARBU, I. MILINOVICI, N. TEODORESCU, *Cocsul metalurgic.* Ed. tehnică, București.
5. W. HEILIGENSTÄDT, *Wärmetechnische Rechnungen für Industrieöfen.* Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1941.
6. A. N. POHVISNEV, *Furnale.* Ed. tehnică, 1954, București.
7. Т. Н. ОЙКС, М. М. ТРУБЕЦКОВ, *Расчеты мартеновских печей.* Металлургиздат, 1949.
8. A. I. MIHAILENCO, *Combustibili și cuptoare metalurgice.* Ed. tehnică, București, 1962.
9. Д. А. СМОЛЯРЕНКО, Н. И. ЕФАНОВ, *Мартеновские цехи с печами большой емкости.* Металлургиздат, Москва, 1960.
10. Н. В. ОКОРОКОВ, *Электроплавильные печи черной металлургии.* Металлургиздат, 1950.
11. Ф. П. ЕДНЕРАЛ, *Электрометаллургия.* Металлургиздат, 1950.
12. * * *, *Manualul inginerului electrician.* **III**. Ed. tehnică, București, 1959.
13. M. L. ZAROSCINSKI, *Laminarea oțelului.* Ed. tehnică, București, 1951.

CONTRIBUȚII ASUPRA METODELOR PENTRU PREDETERMINAREA CONSUMULUI DE ENERGIE ÎN SECTORUL CASNIC

DE

VICTOR CARACUDOVICI și CSABA NAGY

620.98 : 644.113.001.24

Dintre toate categoriile de consumatori de energie, sectorul casnic ocupă un loc aparte, determinat de gradul mare de fărămițare al consumatorilor și de caracterul lor aleator. Faptul că în variația consumului casnic intervin o serie întreagă de elemente economice și sociale, creează dificultăți în determinarea evoluției lui în timp. În cele ce urmează se propune o metodă analitică pentru determinarea consumului de energie și combustibil pentru ansamblul gospodăriilor casnice, în care se evidențiază tocmai legătura lui cu factorii economici și sociali.

Aplicarea unei metode analitice pentru determinarea evoluției în timp a consumului de energie și combustibil de diferite forme pentru ansamblul folosințelor casnice, se bazează pe observația că dintre toți factorii care influențează variația consumului de energie și combustibil pentru o gospodărie, doi au o influență mai importantă :

— numărul membrilor gospodăriei (n_i) și

— suprafața locuinței de care dispune gospodăria (s_i).

Se atrage atenția că nu este vorba de o gospodărie casnică privită izolat ci de o gospodărie determinată ca medie pe un ansamblu de multe gospodării casnice, în așa fel încît influența factorilor secundari se atenuează prin compensare.

Pentru unele dintre folosințele casnice în variația consumului de energie este hotărîtor primul factor, cel de-al doilea avînd o influență minimală. De exemplu, pentru pregătirea hranei consumul de energie

variază cu numărul de persoane din gospodărie și nu variază practic de loc cu suprafața locuinței. Pentru altele însă, factorul principal este suprafața de care dispune gospodăria, celălalt avînd o influență mică. De exemplu, consumul de energie și combustibil pentru încălzitul încăperilor (înălțimea medie a camerelor fiind considerată practic constantă).

Sînt însă cazuri în care nici unul din factorii considerați nu au o influență net hotărîtoare. De exemplu, consumul de energie pentru recepția radio care nu variază direct nici cu numărul de persoane din gospodărie nici cu suprafața acesteia. Atunci se consideră variația consumului total de energie și combustibil cu numărul de gospodării, considerînd pentru fiecare gospodărie un consum mediu de energie pentru utilizarea respectivă, ceea ce se poate reduce fie la variația consumului total cu numărul de total persoane, fie la variația cu suprafața totală a locuințelor, gospodăria medie considerată avînd un număr mediu de membri sau o suprafață medie de utilizare.

În ansamblul sectorului casnic deci, consumul de energie variază pentru unele folosințe, în raport cu numărul locuitorilor încadrați în gospodăriile casnice (N'), $N' = \sum_{i=1}^{G} n_i$ și pentru altele în raport cu suprafața totală a locuințelor (S); $S = \sum_{i=1}^{G} s_i$ (G — fiind numărul gospodăriilor casnice).

Mărimea (N') nu se urmărește de obicei în statistică, însă este legată de numărul total de locuitori (N) prin intermediul unui coeficient $k = \frac{N'}{N}$, care exprimă cota din populația totală care trăiește și deci consumă energie pentru diferite utilizări în sectorul gospodăriilor casnice. Mărimea acestui coeficient este determinată de modul de organizare al vieții sociale, fiind funcție de numărul locuitorilor care trăiesc în așezăminte sociale (cămine, azile, spitale, sanatorii, cazărmi etc.).

Aici au fost considerate și așezămintele sociale cu caracter nepermanent, căminele de studenți de exemplu, întrucît locurile de care dispun sînt totdeauna ocupate de alte persoane, care nu mai consumă energie din sectorul gospodăriilor casnice ci din sectorul comunal. S-a făcut abstracție de perioadele de vacanță și de alte elemente de importanță minoră care intervin în asemenea cazuri.

Pe baza acestor elemente, cunoscînd structura și capacitatea așezămintelor sociale considerate și evoluția lor în timp, poate fi determinată mărimea și evoluția coeficientului k.

Între mărimile S și N se poate stabili pe ansamblu o legătură prin intermediul suprafeței specifice medii pe cap de locuitor: $s = \frac{S}{N}$, care este caracteristică pentru un anumit stadiu de dezvoltare al nivelului de trai.

Aici prin suprafața locuințelor (S) s-a înțeles în accepțiunea termenilor folosiți astăzi în construcțiile civile, suprafața locuibilă (adică supra-

fața efectivă a camerelor de locuit), care se află față de suprafața de construcție desfășurată (S_c) (cea determinată de conturul exterior al clădirilor pe fiecare nivel) în raportul: $\rho = \frac{S}{S_c}$.

Acest raport are o variație relativ mică la construcțiile noi de locuințe și pe ansamblu el se micșorează treptat tinzînd către valorile admise de normative, în așa fel încît în medie el poate fi considerat constant.

A fost necesară această separație întrucît consumul de energie și combustibil pentru diferitele utilizări casnice depinde mult de destinația suprafețelor încăperilor dintr-o gospodărie, de exemplu consumul de energie pentru iluminat. El este în general mai mare la suprafețele locuibile atît prin intensitatea mai mare a iluminatului cît și prin durata lui mai mare de utilizare.

De asemenea, se mai poate stabili o legătură între mărimile N' și G, prin numărul mediu de persoane pe gospodărie $n' = \frac{N'}{G}$.

Este vorba de un număr fictiv de persoane pe gospodărie întrucît nu ține seama de acele persoane care sînt încadrate pe timp limitat în așezămintele sociale, însă dat fiind faptul că se urmărește consumul de energie în sectorul casnic acest indice ne interesează. El poate fi însă ușor determinat din numărul real de persoane pe familie, ca raport între populația totală și numărul total de gospodării $n = \frac{N}{G}$ prin multiplicare cu coeficientul k ($n' = kn$).

De remarcat că și indicile n interesează în studiul consumului casnic de energie întrucît el determină înzestrarea cu mașini și aparate de uz casnic, la alegerea cărora (din punctul de vedere al capacității lor) se ține seama de mărimea reală a familiilor pe durata mai lungă și nu de aceea fictivă, caracteristica unei situații provizorii.

Mărimea n, după cum rezultă din datele statistice, se menține în limite relativ constante lucru care poate fi extrapolat și pentru viitor, deci mărimea n' va varia o dată cu variația coeficientului k.

Consumul total anual de energie și combustibil de o anumită formă (j) pentru o anumită folosință casnică (i) este

$$W_{ij} = N_{ij} \cdot w_{ij}, \tag{1}$$

în care prin N_{ij} s-a notat numărul locuitorilor care beneficiază de utilizarea (i) consumînd pentru aceasta, forma de energie (j), și prin w_{ij} — consumul specific mediu anual pe cap de locuitor pentru utilizarea și forma de energie considerată.

Mărimea (N_{ij}) se poate deduce din (N') dacă se cunosc coeficienții k_i și k_{ij}

$$N_{ij} = k_i \cdot k_{ij} \cdot N', \tag{2}$$

care reprezintă, primul cota din populația încadrată în gospodăriile casnice care beneficiază de utilizarea (i) și al doilea, cota din populația

care beneficiază de utilizarea (i) şi care foloseşte pentru aceasta forma de energie (j)

$$k_i = \frac{N_i}{N'} \quad \text{şi} \quad k_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i}, \tag{2'}$$

N_i — fiind numărul locuitorilor care beneficiază de utilizarea (i). Diferenţa $N' - N_i = \Delta N'$ se compune din trei termeni.

$\Delta N'_1$ — cota din populaţia N' care nu beneficiază de utilizarea (i) din diferite motive (nu i-au simţit încă necesitatea, nu au posibilitatea să o satisfacă etc.);

$\Delta N'_2$ — cota din N' care consumă pentru utilizarea (i) o formă de energie sau combustibil în afară de cele considerate în cadrul bilanţului energetic (de ex. o resursă locală neînsemnată ca pondere pe ansamblul economiei);

$\Delta N'_3$ — cota din N' care consumă pentru utilizarea (i) o formă de energie sau combustibil din alt sector de consum decît cel al gospodăriilor casnice (de exemplu din sectorul comunal).

De exemplu, pentru utilizarea radioreceptoarelor, primul termen ar reprezenta pe acei locuitori încadraţi în gospodăriile casnice care nu au aparate de radiorecepţie, termenul al doilea pe acei locuitori care folosesc pentru aparatele de radio baterii (formă de energie neluată în considerare în studiile de prognoză) şi termenul al treilea, pe acei locuitori care beneficiază de radioficare şi care consumă pentru aceasta energie din sectorul de consum comunal nu din cel casnic.

În acest fel, coeficientul k_{ij} va reprezenta procentual structura consumului de energie pentru o anumită utilizare casnică pe forme de energie şi combustibil.

Consumul specific anual nu poate fi determinat totdeauna direct pe cap de locuitor întrucît consumul pentru o parte din utilizări variază în raport cu suprafaţa locuinţelor, după cum s-a arătat. Pentru acestea se determină deci consumul specific pe unitatea de suprafaţă locuibilă (w^*_{ij}) şi se corectează cu ajutorul unui coeficient ξ pentru consumul suplimentar al suprafeţelor auxiliare.

Ţinînd seama de suprafaţa specifică pentru această categorie de utilizări, relaţia (1) devine

$$W_{ij} = N_{ij} \cdot s \cdot w^*_{ij}\, \xi_{ij}. \tag{3}$$

Pentru cazurile în care acest consum specific nu variază nici în raport cu suprafaţa nici în raport cu numărul de persoane, el se determină pe un aparat consumator corespunzător unei gospodării medii w'_{ij} şi din acesta se deduce consumul pe persoană ţinînd seamă de numărul de persoane pe gospodărie $w_{ij} = \frac{1}{n'} \cdot w'_{ij}$ (de exemplu, consumul unei maşini de aragaz cu 3 ochiuri pentru o gospodărie compusă din 3 persoane).

Ținînd seama de considerentele de mai sus, consumul de energie pentru ansamblul gospodăriilor casnice are forma

$$W = k \cdot N \left[\sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{m} k_i \cdot k_{ij} \cdot w_{ij} + \sum_{i=l+1}^{r} \sum_{j=1}^{m} k_i \cdot k_{ij} \cdot s \cdot w_{ij}^{*} \cdot \xi_{ij} \right]. \qquad (4)$$

Deci pentru determinarea evoluției în timp a consumului de energie pentru sectorul casnic este necesar să se determine în prealabil evoluția unor mărimi neenergetice (N, S, k, k_i) și evoluția structurii consumului (k_{ij}), care rezultă în urma unor studii tehnico-economice comparative asupra diferitelor soluții care vin în considerare pentru alimentarea cu energie a utilizărilor casnice.

De asemenea este necesar să se determine consumurile specifice anuale pentru fiecare utilizare și formă de energie și combustibil, precum și evoluția acestora în timp, ținînd seama de perfecționarea mașinilor și aparatelor de uz casnic și de schimbarea structurii vieții sociale în cadrul gospodăriilor casnice.

Consumul specific anual este de fapt

$$w = \int_0^t q(t) \cdot \mathrm{d}t,$$

BUDAPESTI MŰSZAKI EGYETEM KÖZPONTI KÖNYVTÁRA 1848

q avînd aici semnificația de debit pentru combustibili și de putere pentru energia electrică și admițînd o variație în timp (curbă de sarcină pentru energia electrică și curbă de durată pentru debitele de combustibil).

De obicei, debitul de combustibil se dă ca medie de consum pe oră și de aceea practic consumul specific anual se determină cu relația

$$w = q \cdot h_m, \qquad (5)$$

în care cu h_m au fost notate orele de utilizare ale debitului mediu orar sau ale puterii medii consumate în cazul energiei electrice.

În alte cazuri se indică debitul orar maxim de combustibil sau puterea maximă (racordată a aparatului consumator) și în acest caz relația 5 devine

$$W = q_{\max} \cdot h, \qquad (5')$$

în care h este numărul orelor de utilizare a debitului maxim sau puterii maxime.

Între aceste două relații există legătura $q \cdot h_m = q_{\max} \cdot h$ adică raportul α dintre debitul mediu către cel maxim este egal cu raportul între numărul orelor de funcționare cu puterea sau debitul maxim către numărul orelor de funcționare cu puterea sau debitul mediu.

În practică interesează ambele relații întrucît consumurile de combustibil pentru diferitele arzătoare se dau fie ca medie orară, fie ca încărcare termică. Pentru energia electrică interesează în special cea de-a doua relație, întrucît una din caracteristicile principale ale aparatelor consumatoare este puterea lor instalată funcție de care trebuie determinat consumul de energie electrică.

În aceste condiţii relaţia (4) devine :

$$W = k \cdot N \left[\sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{m} k_i \cdot k_{ij} \cdot q_{ij} \cdot h_{ij} + \sum_{i=l+1}^{r} \sum_{j=1}^{m} k_i \cdot k_{ij} \cdot s \cdot q_{ij}^{*} \cdot h_{ij}^{*} \xi_{ij} \right],$$

sau (6)

$$W = k \cdot N \left[\sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{m} k_i \cdot k_{ij} \cdot q_{ij\,\max} \cdot h_{ij}' + \sum_{i=l+1}^{r} \sum_{j=1}^{m} k_i \cdot k_{ij} \cdot s \cdot q_{ij\,\max}^{*} \cdot h_{ij}^{*} \xi_{ij} \right],$$

în care cu indici stelaţi au fost notaţi cei care se referă la consumul pe unitatea de suprafaţă.

Pentru consumatorii de energie electrică şi pentru cei de gaze naturale interesează pe lîngă consumul de energie şi puterea maximă sau debitul maxim cu care ansamblul de consumatori casnici solicită reţeaua electrică sau de gaze.

Aceasta se deduce tot din relaţia generală considerînd coeficientul α definit mai sus ca raport între puterea medie consumată şi cea maximă instalată şi un alt coeficient β, definit ca raport între numărul consumatorilor aflaţi în funcţiune la un moment dat şi numărul total al consumatorilor de acelaşi tip — coeficient de simultaneitate.

În acest fel pentru energia electrică puterea cu care solicită reţeaua toţi consumatorii casnici de energie electrică va fi

$$P = kN \left[\sum_{i=1}^{l} k_i \cdot k_{ie} \cdot p_{\max} \cdot \alpha_{ie} \cdot \beta_{ie} + \sum_{i=l+1}^{r} k_i \cdot k_{ie} \cdot p_{\max}^{*} \cdot s \cdot \alpha_{ie} \cdot \beta_{ie} \right]. \quad (7)$$

Pentru caracterizarea influenţei consumului casnic asupra reţelelor de distribuţie este necesar deci să se determine pentru fiecare tip de consumatori puterile sau debitele de combustibil maxime, coeficienţii de simultaneitate precum şi evoluţia acestora în timp.

Metoda propusă mai sus are avantajul că printr-un sistem unitar de indici care pot fi determinaţi parţial din datele statistice existente şi din unele anchete cu un volum relativ redus, se poate face o prognoză pentru toate utilizările casnice ale energiei şi combustibilului. Unitatea sistemului de indici dă posibilitatea ca în aprecierea evoluţiei lor în timp să se poată controla reciproc unele din valorile obţinute, prin aceasta mărind gradul de precizie al previziunilor.

Întrucît la baza sistemului de indici stau mase statistice de volum foarte mare, valorile lor au stabilitate mare şi dau o siguranţă suficientă pentru planificarea necesarului de energie în acest sector.

ZU DEN METHODEN FÜR DIE VORAUSBESTIMMUNG DER ENERGIE BEDARF—PROGNOSE IM HÄUSLICHEN SEKTOR

ZUSAMMENFASSUNG

Die von den Verfassern vorgeschlagene Methodik stützt sich auf ein einheitliches System von Kennziffern. Durch Ermittlung der Dynamik dieser Kennziffern und ihrer Wechselwirkungen können Globalprognosen

des Energieverbrauches für Haushaltszwecke mit befriedigender Genauigkeit aufgestellt werden, insbesondere wenn die Bestimmung der Kennziffern sich auf einzelne Teilerhebungen stützt. Diese Methodik ist besonders für eine Planwirtschaft angezeigt.

BIBLIOGRAFIE

1. V. CARACUDOVICI, S. MANEA, Cs. NAGY, G. PANAITESCU, *Considerații asupra consumului casnic de energie electrică pentru iluminat în R.P.R.* St. cerc. energ., A, *1* (1963).
2. E. O. STEINGAUS, *Problemele alimentării cu energie în proiectarea orașelor.* Ed. energetică de stat, 1954.
3. A. LANGNER, *Untersuchungen zum Elektroenergie-Leistungsbedarf der Haushalte und Möglichkeiten einer breiteren Ausnutzung der Elektroenergie im häuslichen Sektor.* Teil I, II, III. Institut für Energetik-Leipzig, Mitteilungen, *13*, *14*, *15* (1958).

CALCULUL FORȚELOR AXIALE LA AUTOTRANSFORMATORUL DE REGLAJ

DE

C. APETREI, C. BĂLĂ, N. ȘTEFĂNESCU și I. BAHRIN

621.314.223.014 : 332.045.53

În R.P.R. s-au construit autotransformatoare trifazate de mare putere destinate reglajului longitudinal al tensiunii din sistemul energetic. Astfel „Uzinele Electroputere" au realizat autotransformatoare trifazate de 60 MVA cu tensiunile nominale 110 kV/110 kV $\pm$ 20% [1], în prezent fiind în curs de asimilare autotransformatoare cu puteri pînă la 200 MVA.

O problemă specială la aceste autotransformatoare o reprezintă rezistența mecanică a autotransformatorului la scurtcircuit ; determinarea forțelor electrodinamice radiale este relativ simplă, deoarece înfășurările sînt dispuse concentric. În schimb, calculul forțelor axiale la autotransformator este mai dificil decît la un transformator de construcție obișnuită, datorită poziției relative a înfășurărilor principale și de reglaj.

În lucrarea de față, executată în cadrul catedrei de mașini electrice de la Institutul politehnic București în colaborare cu „Uzinele Electroputere" Craiova, se stabilesc expresiile de calcul ale curenților de scurtcircuit la autotransformatoare în funcție de schema de conexiune în rețea și se prezintă considerațiile care au stat la baza calculului forțelor axiale care se exercită asupra înfășurării de reglaj a unui autotransformator realizat la „Uzinele Electroputere" ; determinarea valorilor forțelor s-a făcut prin metoda imaginilor magnetice — cu ajutorul unui calculator electronic — și prin metoda amperspirelor reziduale detaliată considerîndu-se dată valoarea curentului prin înfășurarea de reglaj. În lucrare se dau rezultatele obținute în cazul concret analizat, se compară metodele

aplicate şi se stabilesc concluzii privind avantajele şi erorile de calcul ale celor două metode utilizate. Calculele s-au efectuat fără a se ţine seama de influenţa jugurilor şi coloanelor vecine; de aceste influenţe se poate ţine seama conform indicaţiilor date în lucrare [10].

1. CURENŢII DE SCURTCIRCUIT AI AUTOTRANSFORMATOARELOR DE REGLAJ

În literatură [2] sînt indicate următoarele scheme de interconexiune ale autotransformatorului în sistem (fig. 1).

În schemele 1-*a* şi 1-*b* autotransformatorul ridică tensiunea de la U la U', iar în schemele 1-*c* şi 1-*d* o micşorează de la U la U'; tensiunea de alimentare este U în schemele 1-*a* şi 1-*c*, respectiv U' în schemele 1-*b* şi 1-*d*.

Întrucît analiza cazurilor 1-*b* şi 1-*d* poate fi redusă la studiul schemelor 1-*a* şi 1-*c*, cînd cele două înfăşurări — înfăşurarea de bază (1) şi de reglaj (2) — sînt conectate în serie, respectiv în opoziţie, în continuare se vor avea în vedere schemele 1-*a* şi 1-*c*.

Ecuaţiile de funcţionare ale autotransformatorului în regim staţionar se stabilesc în mod obişnuit ca la transformatoare prin considerarea

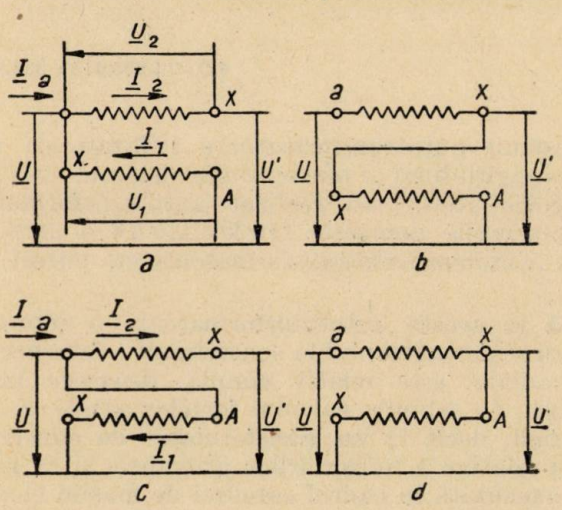


Fig. 1. — Schema de conexiuni a autotransformatorului de reglaj cu înfăşurările conectate în serie şi respectiv în opoziţie.

relaţiilor suplimentare între curenţii şi tensiunile de linie, respectiv curenţii şi tensiunile înfăşurărilor autotransformatorului.

În cazul schemei 1-*a* ecuaţiile, scrise în complex, au forma

$$\begin{aligned} \underline{E}_1 &= -\underline{U}_1 + Z_1 \underline{I}_1, \\ \underline{E}_2 &= \underline{U}_2 + Z_2 \underline{I}_2. \end{aligned} \tag{1}$$

Ecuaţiile s-au stabilit considerîndu-se înfăşurările AX şi ax ca înfăşurări independente: AX, înfăşurare primară şi ax, înfăşurare secundară.

Relațiile între curenții $\underline{I}$, $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$, $\underline{I}'$ respectiv $\underline{U}$, $\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$, $\underline{U}'$ au forma

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 + k_{21}\underline{I}_2 &= \underline{I}_0 \,, \\ \underline{I}' &= \underline{I}_2 \,, \\ \underline{I} &= -\underline{I}_1 + \underline{I}_2 \,, \\ \underline{U}_1 &= -\underline{U} \,, \\ \underline{U}' &= \underline{U} + \underline{U}_2 \,. \end{aligned} \tag{2}$$

Curentul $\underline{I}_0$ este raportat la numărul de spire al înfășurării primare w_1, iar $k_{21} = \dfrac{w_2}{w_1}$, unde w_2 reprezintă numărul de spire al înfășurării secundare.

Rezolvînd ecuațiile (1) prin considerarea relațiilor (2) și avînd în vedere că $\underline{E}_1 = \dfrac{1}{k_{21}}\underline{E}_2 = -Z_{12}\underline{I}_0$, expresiile curenților $\underline{I}$, $\underline{I}'$, $\underline{I}_1$ și $\underline{I}_2$ se pot stabili sub forma

$$\begin{aligned} \underline{I} &= \frac{[(Z_1+Z_2)+(1+k_{21})^2 Z_{12}]\,\underline{U} - [Z_1+(1+k_{21})Z_{12}]\,\underline{U}'}{Z_1Z_2+(Z_2+k_{21}^2Z_1)Z_{12}}, \\ \underline{I}' &= \frac{[Z_1+(1+k_{21})Z_{12}]\,\underline{U} - (Z_1+Z_{12})\,\underline{U}'}{Z_1Z_2+(Z_2+k_{21}^2Z_1)Z_{12}}, \\ \underline{I}_1 &= \frac{k_{21}Z_{12}\underline{U}' - [Z_2+k_{21}(1+k_{21})Z_{12}]\,\underline{U}}{Z_1Z_2+(Z_2+k_{21}^2Z_1)Z_{12}}, \\ \underline{I}_2 &= \underline{I}'. \end{aligned} \tag{3}$$

În (3) Z_{12} reprezintă impedanța circuitului de magnetizare.

În cazul schemei 1-*c* relațiile între curenții $\underline{I}$, $\underline{I}_1 \ldots$, respectiv tensiunile $\underline{U}$, $\underline{U}_1 \ldots$ au forma următoare :

$$\begin{aligned} \underline{I}' &= \underline{I}_2, \\ \underline{I} &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2, \\ \underline{U}_1 &= \underline{U}, \\ \underline{U}' &= \underline{U} + \underline{U}_2. \end{aligned} \tag{2'}$$

Curenții $\underline{I}$, $\underline{I}'$, $\underline{I}_1$ și $\underline{I}_2$ au expresiile :

$$\begin{aligned} \underline{I} &= \frac{[(Z_1+Z_2)+(1-k_{21})^2 Z_{12}]\,\underline{U} - [Z_1+(1-k_{21})Z_{12}]\,\underline{U}'}{Z_1Z_2+(Z_2+k_{21}^2Z_1)Z_{12}}, \\ \underline{I}' &= \frac{[Z_1+(1-k_{21})Z_{12}]\,\underline{U} - (Z_1+Z_{12})\,\underline{U}'}{Z_1Z_2+(Z_2+k_{21}^2Z_1)Z_{12}}, \\ \underline{I}_1 &= \frac{k_{21}Z_{12}\,\underline{U}' + [Z_2-k_{21}(1-k_{21})Z_{12}]\,\underline{U}}{Z_1Z_2+(Z_2+k_{21}^2Z_1)Z_{12}}, \\ \underline{I}_2 &= \underline{I}'. \end{aligned} \tag{3'}$$

Scurtcircuitele posibile în cazul schemelor 1-*a* și 1-*c* sînt reprezentate în figura 2.

Curenții de scurtcircuit în regim staționar se calculează considerînd într-o primă aproximație sistemul energetic de putere infinită și curentul de magnetizare $\underline{I}_0 \cong 0$. Expresiile curenților de scurtcircuit prin înfășu-

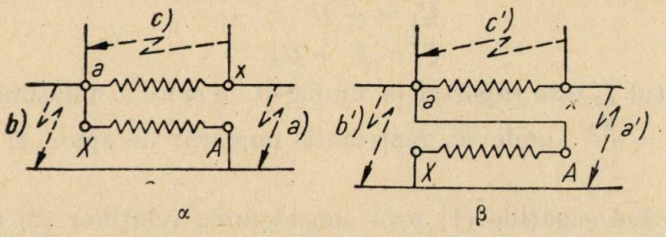


Fig. 2. — Scurtcircuitele posibile ale autotransformatorului de reglaj cu înfășurările conectate în serie și opoziție.

rări, $\underline{I}_{1k}$ și $\underline{I}_{2k}$, se obțin din relațiile (3) și (3′) dacă se înlocuiește $Z_{12} = \infty$ și se face succesiv $\underline{U}' = 0$, $\underline{U} = 0$, $\underline{U}_2 = 0$. Curenții de scurtcircuit în cele 3 cazuri reprezentate în figura 2-α se obțin sub forma

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{1ka} &= -\frac{k_{21}(1+k_{21})\,\underline{U}}{Z_{k21}}, \\
\underline{I}_{2ka} &= \frac{(1+k_{21})\,\underline{U}}{Z_{k21}}, \\
\underline{I}_{1kb} &= \frac{k_{21}\,\underline{U}'}{Z_{k21}}, \\
\underline{I}_{2kb} &= -\frac{\underline{U}'}{Z_{k21}}, \\
\underline{I}_{1kc} &= -\frac{k_{21}^2\,\underline{U}'}{Z_{k21}}, \\
\underline{I}_{2kc} &= \frac{k_{21}\,\underline{U}'}{Z_{k21}}.
\end{aligned} \tag{4}$$

În cazurile reprezentate în figura 2-β, curenții de scurtcircuit au expresiile

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{1ka'} &= -\frac{k_{21}(1-k_{21})\,\underline{U}}{Z_{k21}}, \\
\underline{I}_{2ka'} &= \frac{(1-k_{21})\,\underline{U}}{Z_{k21}}, \\
\underline{I}_{1kb'} &= \frac{k_{21}\,\underline{U}'}{Z_{k21}},
\end{aligned} \tag{4'}$$

$$\underline{I}_{2kb'} = -\frac{\underline{U}'}{Z_{k21}},$$
$$\underline{I}_{1kc'} = \frac{\underline{U}'}{Z_{k21}}, \qquad (4')$$
$$\underline{I}_{2kc'} = -\frac{k_{21}\underline{U}'}{Z_{k21}}.$$

În (4) și (4′) $Z_{k21}=Z_2+k_{21}^2Z_1$ reprezintă impedanța de scurtcircuit a autotransformatorului raportată la înfășurarea secundară.

Din examinarea expresiilor (4) și (4′) rezultă că valorile maxime pentru curenții de scurtcircuit se obțin în cazul cînd scurtcircuitul intervine pe joasa sau înalta tensiune, cele două situații fiind practic echivalente; natura conexiunii, în serie sau opoziție, influențează valoarea curentului de scurtcircuit doar în cazul cînd $\underline{U}'=0$

Determinarea curenților de scurtcircuit se face în practică prin considerarea impedanței sistemului Z_s, deoarece, după cum este cunoscut, impedanța proprie a autotransformatorului nu poate limita curenții de scurtcircuit la valori acceptabile. Considerînd impedanța sistemului în serie cu impedanța echivalentă a autotransformatorului la scurtcircuit și notînd cu $\underline{I}_k$ curentul de scurtcircuit al rețelei, expresiile curenților de scurtcircuit prin înfășurări la $\underline{U}'=0$ și $\underline{U}=0$ au forma următoare:

$$\underline{I}_{1ka} = -\frac{k_{21}}{1+k_{21}}\underline{I}_k, \qquad \underline{I}_{1ka'} = -\frac{k_{21}}{1-k_{21}}\underline{I}_k,$$
$$\underline{I}_{2ka} = \frac{1}{1+k_{21}}\underline{I}_k, \qquad (5) \qquad \underline{I}_{2ka'} = \frac{1}{1-k_{21}}\underline{I}_k, \qquad (5')$$
$$\underline{I}_{1kb} = k_{21}\underline{I}_k, \qquad \underline{I}_{1kb'} = k_{21}\underline{I}_k,$$
$$\underline{I}_{2kb} = -\underline{I}_k, \qquad \underline{I}_{2kb'} = -\underline{I}_k.$$

Din examinarea expresiilor (5) și (5′) rezultă, că la curent de scurtcircuit al rețelei dat, situația cea mai defavorabilă intervine la conexiunea în opoziție, curenții de scurtcircuit obținînd în acest caz valori maxime; pe lîngă această concluzie mai trebuie să se aibă în vedere și faptul că pierderile suplimentare la conexiunea în opoziție sînt mai mari decît în cazul conectării înfășurărilor în serie.

2. CALCULUL FORȚELOR AXIALE PRIN METODA IMAGINILOR MAGNETICE

a. *Înfășurările repartizate*

În numeroase lucrări [3], [4], [5], [6], [7], s-au stabilit expresii ale forțelor electrodinamice axiale care apar în transformatoarele de putere. Ipotezele adoptate în unele dintre aceste lucrări pentru rezolvarea problemei sînt următoarele:

— solenațiile înfășurărilor sînt repartizate după axele secțiunilor înfășurărilor, neglijîndu-se astfel influența grosimii înfășurărilor;

— de prezenţa coloanelor se ţine seama considerînd înfăşurările introduse între doi pereţi feromagnetici de permeabilitate magnetică infinită aşezaţi la o distanţă egală cu lărgimea ferestrei; se calculează astfel forţele care se exercită între o înfăşurare şi celelalte înfăşurări împreună cu imaginile lor;

— se neglijează influenţa curburii înfăşurărilor; se consideră astfel înfăşurările desfăşurate şi se presupun suprafeţele conductoare plane de lăţime egală cu înălţimea reală a înfăşurărilor şi de lungime infinită:

— de prezenţa jugurilor se poate ţine seama calculînd forţele care se exercită între înfăşurarea respectivă şi imaginile înfăşurărilor faţă de juguri; întrucît în cazul transformatoarelor caracterizate printr-un raport mare (2...5) dintre înălţimea şi lărgimea ferestrei, influenţa jugurilor este redusă şi se neglijează de obicei;

— forţele axiale proprii de comprimare ale unei înfăşurări nu se calculează, întrucît rezultanta lor este nulă şi nu contribuie prin urmare la forţele de deplasare.

Astfel valoarea maximă a forţei de deplasare care se exercită asupra înfăşurării din figura 3, datorită înfăşurării μ se calculează după relaţia v[8])

$$F_\mu = 145\cdot 10^{-8}\frac{w_\varepsilon I_{m\varepsilon}\, w_\mu I_{m\mu}}{h_\varepsilon h_\mu} R_\mu \sum_\nu \Big\{ (h_\mu + c_{\varepsilon\mu}) \lg [(h_\mu + c_{\varepsilon\mu})^2 + s^2_{\nu_\varepsilon\mu}] -$$

$$- c_{\varepsilon\mu} \lg [c^2_{\varepsilon\mu} + s^2_{\nu_\varepsilon\mu}] - (h_\mu + c_{\varepsilon\mu} - h_\varepsilon) \lg [(h_\mu + c_{\varepsilon\mu} - h_\varepsilon)^2 + s^2_{\nu_\varepsilon\mu}] -$$

$$- (h_\varepsilon - c_{\varepsilon\mu}) \lg [(h_\varepsilon - c_{\varepsilon\mu})^2 + s^2_{\nu_\varepsilon\mu}] + 0{,}87\, s_{\nu_\varepsilon\mu} \Big[\operatorname{arctg} \frac{h_\mu + c_{\varepsilon\mu}}{s_{\nu_\varepsilon\mu}} - \tag{6}$$

$$- \operatorname{arctg} \frac{c_{\varepsilon\mu}}{s_{\nu_\varepsilon\mu}} - \operatorname{arctg} \frac{h_\mu + c_{\varepsilon\mu} - h_\varepsilon}{s_{\nu_\varepsilon\mu}} - \operatorname{arctg} \frac{h_\varepsilon - c_{\varepsilon\mu}}{s_{\nu_\varepsilon\mu}} \Big],$$

în care $I_{m\varepsilon}$ şi $I_{m\mu}$ sînt valorile maxime ale curentului prin înfăşurarea ε, respectiv μ,

h_μ, h_ε — înălţimile înfăşurărilor μ respectiv ε,

R_μ — raza medie a înfăşurării,

$s_{\nu_\varepsilon\mu}$ — distanţa de la imaginea ν_ε a înfăşurărilor ε (inclusiv de la înfăşurările ε), la înfăşurarea μ.

Introducînd valoarea maximă a curentului în [A] şi calculînd cu logaritmii zecimali, forţa rezultă în [N].

Distanţa $s_{\nu_\varepsilon\mu}$ dintre înfăşurarea μ şi imaginile de ordinul ν ale înfăşurării ε se calculează după relaţia

$s_{\nu_\varepsilon\mu} = \nu l \pm (\beta - \alpha)$ pentru ν impar,

$s_{\nu_\varepsilon\mu} = \nu l \pm [l - (\beta + \alpha)]$ pentru ν par.

În cazul particular cînd $\alpha + \beta = l$ rezultă

$s_{\nu_\varepsilon\mu} = \nu l \pm (\beta - \alpha)$ pentru ν impar,

$s_{\nu_\varepsilon\mu} = \nu l \pm 0$ pentru ν par.

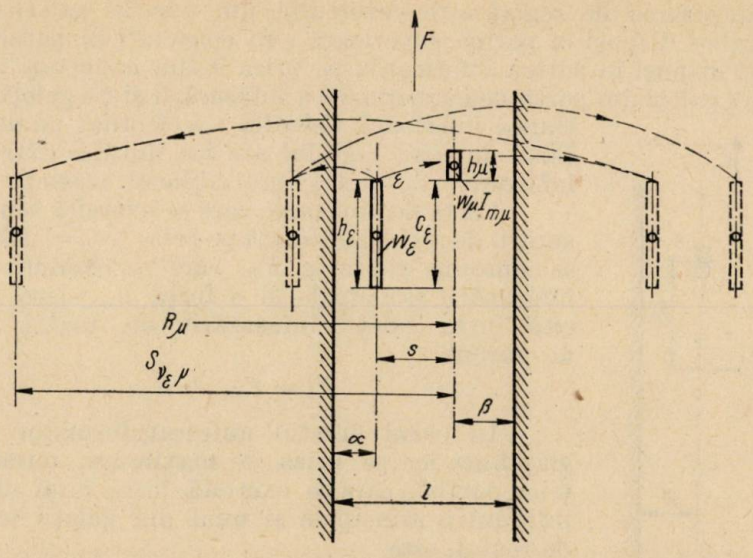


Fig. 3. — Explicativă la metoda imaginilor aplicată la înfășurări repartizate.

b. *Înfășurări concentrate*

În cazul cînd înfășurările pot fi reduse la conductoare filiforme, expresia de calcul a forței axiale are o formă mai simplă

$$F_\mu = 125{,}6 \cdot 10^{-8}\ w_\varepsilon I_{m\varepsilon}\, w_\mu I_{m\mu} \sum_\nu \frac{c_{\varepsilon\mu} R_\mu}{s^2_{\nu_\varepsilon\mu} + c^2_{\varepsilon\mu}}\ [\mathrm{N}], \tag{7}$$

în care c_ε este diferența cotelor axelor înfășurărilor μ și ε, iar celelalte mărimi au semnificația din paragraful precedent.

c. *Exemplul de calcul*

S-au calculat cu ajutorul calculatorului electronic, prin metoda imaginilor magnetice, forțele electrodinamice axiale care apar în cazul autotransformatorului prezentat în [1].

În figura 5 s-a reprodus o secțiune transversală prin fereastra autotransformatorului, din care rezultă caracteristicile înfășurărilor. Astfel înfășurarea principală a autotransformatorului este dispusă lîngă miez și este formată din $n_0 = 105$ galeți. De observat că înfășurarea nu este repartizată uniform; galeții însăși sînt de construcție diferită în porțiunea superioară a înfășurării, atît din punctul de vedere al dimensiunilor geometrice, cît și în ceea ce privește numărul de spire.

Înfășurarea de reglaj este construită din $n = 48$ galeți identici; cei 24 galeți dispuși în partea superioară sînt conectați în paralel cu cei 24 galeți dispuși în partea inferioară; pe priza λ sînt conectați în circuit numai 2λ galeți din porțiunea superioară a înfășurării și 2λ galeți din porțiunea inferioară. Calculul s-a efectuat numai pentru cazul în care reglajul are loc dinspre extremitățile înfășurării de reglaj spre mijlocul acesteia.

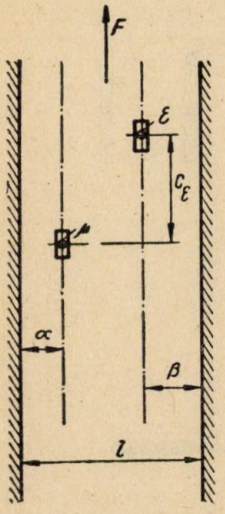


Fig. 4. — Explicativă la metoda imaginilor aplicată la înfășurări concentrate.

Forța de deplasare care se exercită asupra înfășurării de reglaj conectată pe priza λ (λ=1,2,3,. . ., 12) se compune din forța $F_{or\lambda}$ care se exercită datorită înfășurării principale și o forță $F_{rr\lambda}$ care se exercită între galeții înfășurării de reglaj, parcurși de curent

$$F_\lambda = F_{or\lambda} + F_{rr\lambda}. \tag{8}$$

În cazul acestui autotransformator cînd reglajul are loc pe priza de maximum, numărul forțelor parțiale care se exercită între unul din galeții înfășurării principale și unul din galeții înfășurării de reglaj, este

$$n_{or} = n_0 \times n_r, \tag{9}$$

iar numărul forțelor parțiale dintre galeții din porțiunea superioară și cea din porțiunea inferioară ai înfășurării de reglaj este

$$n_{rr} = C^2_{n_r} - 2C^2_{n_r/2}. \tag{10}$$

Prin urmare, fără a considera influența imaginilor magnetice ar trebui calculate $n_{or} \times n_{rr} = 5\,616$ expresii (5) sau (7).

În privința numărului de imagini care trebuie considerat s-a observat că seria de valori a forțelor date de imagini este relativ slab convergentă. După cum se arată în lucrarea [8] s-au calculat forțele pe care le produc imaginile pînă la ordinul 256. În cazul autotransformatorului examinat s-a constatat că:

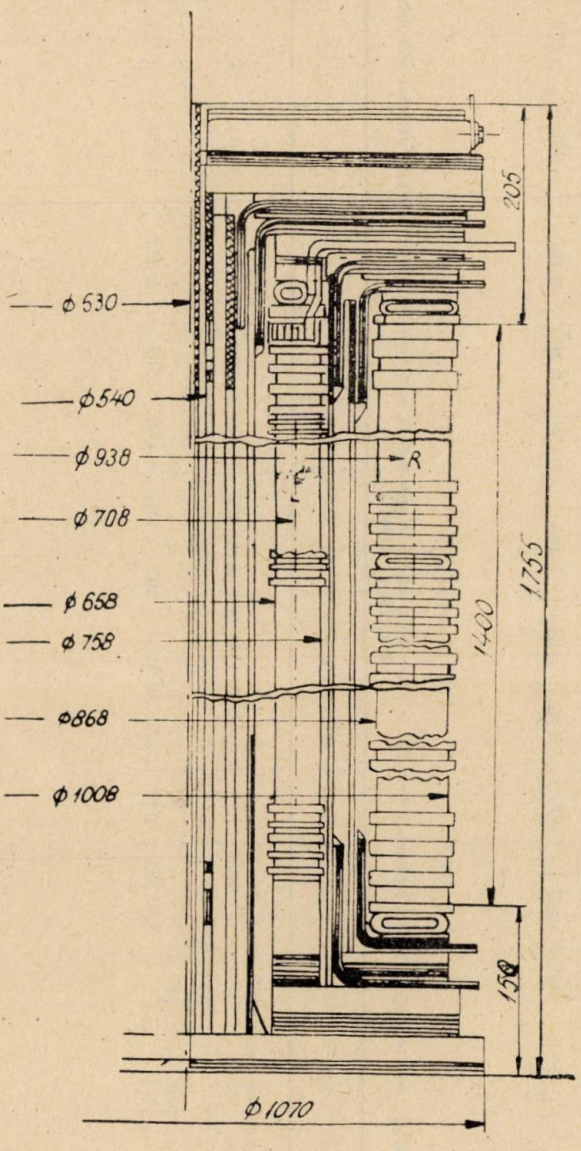
— este suficient să se considere un număr mai redus de imagini,

— alegerea unui număr mai mare de imagini decît 40, conducea la valori ale forțelor care se înscriu în zona erorilor de calcul ale calculatorului electronic utilizat. Prin urmare dacă ne limităm la aproximativ 40 imagini, numărul de expresii (6) sau (7) care trebuie calculate este 224 640.

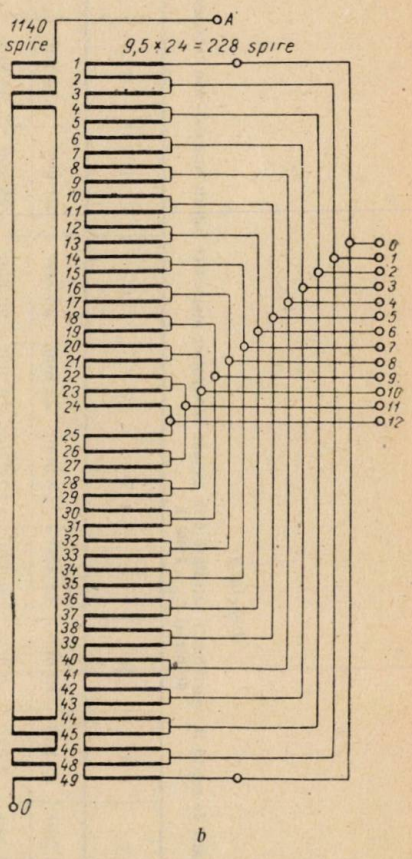
Pentru a simplifica volumul de calcul relativ mare — chiar pentru un calculator electronic — în cazul aplicării metodei imaginilor magnetice s-au introdus simplificări suplimentare:

— înfășurarea principală (fig. 5) s-a considerat repartizată uniform; înfășurarea de reglaj s-a considerat cu repartiția ei discretă ca în cazul autotransformatorului real și conectată după una din schemele reprezentate în figura 2,

— forțele $F_{or\lambda}$ s-au calculat după expresia (6), iar forțele $F_{rr\lambda}$ s-au calculat după expresia simplificată (7).



a



b

Fig. 5 *a*, *b*. — Secțiune longitudinală prin fereastra autotransformatorului de 60 MVA.

Tabela 1

Forţele axiale care se exercită asupra înfăşurării de reglaj la scurtcircuit calculate prin metoda imaginilor magnetice pentru curentul prin înfăşurarea de reglaj $I_m = 1000$ A

Ordinul treptei $\lambda =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$F_{or\lambda}$ [N]	511	1 950	4 230	7 150	10 600	14 420	18 500	22 600	26 800	31 000	34 900	38 300
$F_{rr\lambda}$ [N]	−248	−983	−2 240	−3 980	−6 250	−9 020	−12 370	−16 300	−20 650	−25 800	−31 800	−39 200
$F_{\lambda i} = F_{or\lambda} + F_{rr\lambda}$ [N]	263	967	1 990	3 170	4 350	5 400	6 130	6 300	6 150	5 220	3 100	−900

Tabela 2

Forţele axiale care se exercită asupra înfăşurării de reglaj la scurtcircuit calculate prin metoda amperspirelor reziduale pentru curentul prin înfăşurarea de reglaj $I_m = 1000$ A

Ordinul treptei $\lambda =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Forţa asupra porţiunii de sus $F_{\lambda s}$ [N]	264	1 016	2 168	3 276	5 119	6 675	7 854	8 837	9 628	9 204	8 261	6 341
Forţa asupra porţiunii de jos $F_{\lambda i}$ [N]	252	934	1 854	2 925	3 397	4 892	5 480	5 761	5 458	4 376	2 496	128

În tabela 1 sînt cuprinse rezultatele de calcul; drept sens pozitiv al forțelor axiale s-a considerat sensul marcat în figurile 3 și 4.

Forțele s-au calculat pentru cazul în care curentul prin înfășurarea de reglaj ar avea valoarea maximă de 1 000 A și ar fi conectată succesiv pe prizele 1,2,3,..., 12.

În tabela 1 sînt prezentate forțele $F_{or\lambda}$, $F_{rr\lambda}$ și $F_{\lambda i}$ care se exercită asupra galeților de reglaj notați în figura 5 cu 25,..., 48, ai porțiunii inferioare de reglaj.

3. CALCULUL FORȚELOR AXIALE PRIN METODA AMPERSPIRELOR REZIDUALE

În lucrarea [9] este prezentată metoda amperspirelor reziduale; solenația reziduală produce componenta radială a cîmpului magnetic. În [10] se prezintă această metodă într-o formă detaliată pentru calculul forțelor care se exercită asupra fiecărui element de înfășurare în parte.

În figura 6 sînt reproduse din înfășurările transformatorului numai conductoarele blanc, pe baza cărora s-au calculat tensiunile magnetice F_0 — a înfășurării principale —, $F_1, F_2, F_3, F_4, \ldots, F_{12}$ — ale înfășurării de reglaj co-

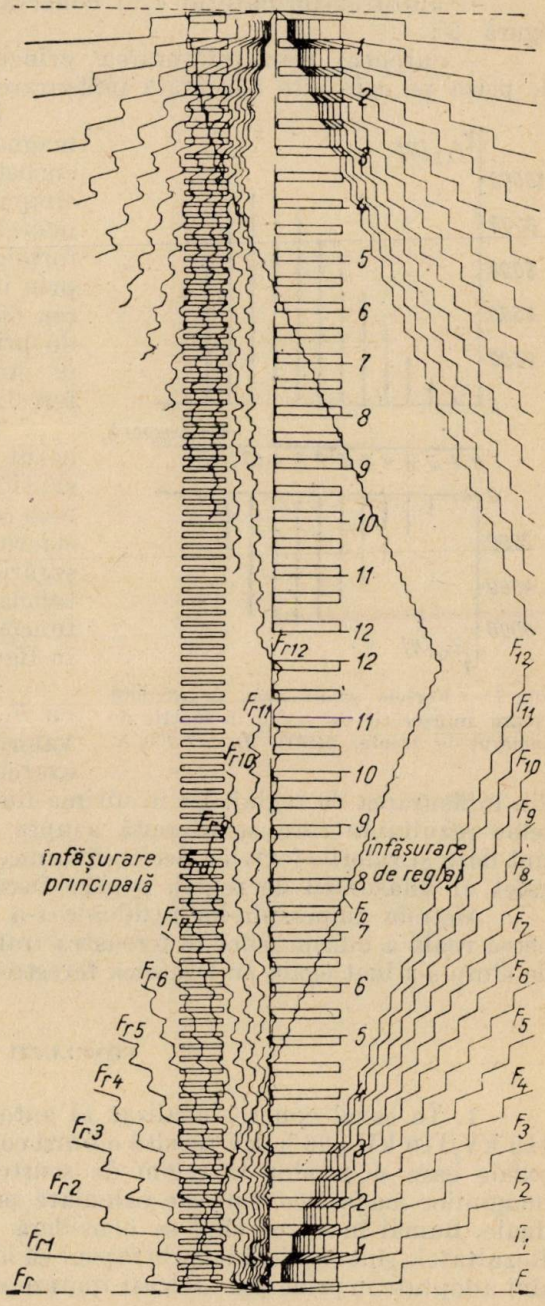


Fig. 6. — Curbele tensiunilor magnetice ale înfășurării principale F_0, ale înfășurării de reglaj $F_1, F_2, \ldots F_{12}$ și curbele tensiunilor magnetice rezultante $F_{r1}, F_{r2}, \ldots F_{r12}$.

nectată pe prizele 1, 2, 3, 4, . . ., 12 — și tensiunile magnetice rezultante F_{r1}, F_{r2}, F_{r3}, . . ., F_{r12}; ipotezele admise sînt următoarele :

— autotransformatorul este conectat după una din schemele din figura 2 ;

— curentul prin înfășurarea principală este constant indiferent de priza pe care este conectată înfășurarea de reglaj.

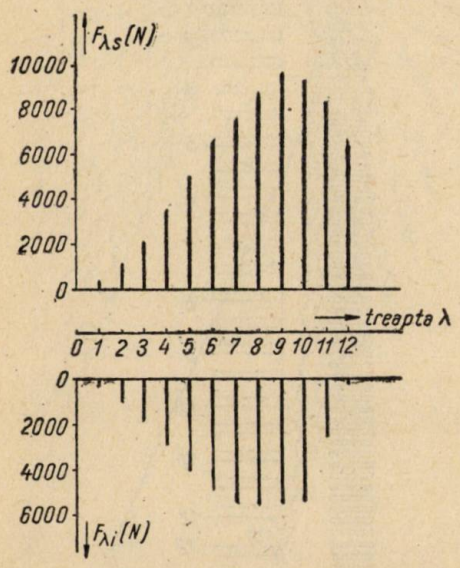


Fig. 7. — Forțele axiale care se exercită asupra înfășurării de reglaj în funcție de numărul de trepte, pentru $I_m = 1\,000$ A.

Pe baza curbelor tensiunilor magnetice rezultante s-au determinat curbele componentelor radiale ale cîmpului magnetic, respectiv componentele forțelor. Apoi s-au recalculat forțele pentru cazul în care curentul prin înfășurarea de reglaj are valoarea maximă $I_m = 1\,000$ A, indiferent de priza de reglaj. Lungimea liniei de cîmp s-a luat egală cu lărgimea ferestrei.

S-au calculat forțele axiale în cazul autotransformatorului analizat și prin această metodă în aceleași ipoteze ca în cazul precedent, însă considerîndu-se repartiția reală a înfășurărilor. Rezultatele sînt trecute în tabela 2 și reprezentate grafic în funcție de numărul treptei de reglaj în figura 7.

În prima linie de date notată cu $F_{\lambda s}$ din tabela 2, sînt prezentate valorile forțelor rezultante care se exercită asupra porțiunii superioare din înfășurarea de reglaj, iar în ultima linie notată cu $F_{\lambda i}$ — valorile forțelor rezultante care se exercită asupra porțiunii inferioare. În tabelă sînt date și valorile forțelor electrodinamice axiale care se produc în fiecare galet al înfășurării de reglaj, pentru fiecare treaptă de reglaj în parte.

Metoda amperspirelor reziduale s-a aplicat, considerîndu-se dispunerea reală a înfășurărilor în fereastra transformatorului. Lungimea liniei de cîmp s-a luat egală cu lărgimea ferestrei.

CONCLUZII

1. În cazul concret analizat al autotransformatorului de 60 MVA, 110 kV/110 kV $\pm$20% kV rezultă o bună concordanță între valorile forțelor axiale care se produc în regim de scurtcircuit — obținute prin metoda imaginilor magnetice, cu cele calculate prin metoda amperspirelor reziduale, numai în cazul cînd se consideră primele 5—6 trepte de reglaj. Rezultatele sînt explicabile prin faptul că la baza aplicării ambelor metode sînt adoptate în principal aceleași ipoteze simplificatoare. Diferențele sen-

sibile care se observă pentru celelalte trepte de reglaj (în special pentru ultima treaptă) provin din erorile de calcul care apar la aplicarea metodei imaginilor, întrucît forțele axiale calculate prin această metodă se determină din diferența forțelor care se exercită între înfășurarea principală și înfășurarea de reglaj și forțele care se exercită între cele două porțiuni ale înfășurării de reglaj. Valorile acestor forțe sînt comparabile și diferența lor se înscrie în zona erorilor de calcul.

2. Metoda amperspirelor reziduale este mult mai simplă de aplicat; prin această metodă se calculează direct forțele rezultante care se exercită asupra porțiunilor de înfășurări.

Metoda imaginilor magnetice este relativ dificil de aplicat chiar în cazul în care se utilizează un calculator electronic. Numărul mare de operații care rezultă la considerarea înfășurărilor cu repartiția lor reală necesită prea mult timp de calcul; pentru reducerea lor se impune introducerea unor simplificări suplimentare față de metoda amperspirelor reziduale dintre care menționăm considerarea înfășurărilor ca fiind uniform repartizate sau ca înfășurări concentrate. Simplificările adoptate conduc la erori suplimentare de calcul (tabelele 1 și 2).

3. În cazul concret analizat se observă următoarele:

— forțele electrodinamice calculate sînt mai mari asupra porțiunii de înfășurare superioară decît asupra porțiunii de înfășurare inferioară; în consecință se poate proceda la o redispunere a înfășurării de reglaj față de înfășurarea principală pentru a rezulta eforturi mai reduse;

— pe baza forțelor axiale calculate se poate verifica construcția transformatorului în vederea asigurării unei mai bune comportări la forțele electrodinamice de scurtcircuit;

— cunoscînd forțele electrodinamice în funcție de curentul de scurtcircuit se poate determina puterea maximă de scurtcircuit pe care o poate avea rețeaua în punctul în care este conectat autotransformatorul, pentru a nu depăși eforturile limită admisibile; respectiv la un autotransformator dat se poate preciza treapta maximă admisibilă de reglaj pentru a nu se depăși eforturile mecanice admisibile.

CALCUL DES FORCES AXIALES DANS UN AUTOTRANSFORMATEUR DE RÉGLAGE

RÉSUMÉ

Dans la première partie du travail, les auteurs établissent les relations de calcul des courants de court-circuit dans les autotransformateurs de réglage, en fonction du schéma de connexions du réseau électrique; en

première approximation, les courants de court-circuit sont déterminés en considérant l'autotransformateur relié, d'abord, à une source à tension constante et, ensuite, à une source à courant constant (l'impédance du transformateur est négligée et les courants sont limités par l'impédance du système).

Dans la seconde partie du travail, ils exposent les considérations sur lesquelles est appuyé le calcul des forces axiales agissant sur les enroulements de réglage d'un autotransformateur de fabrication ordinaire. Le calcul des forces est effectué soit par la méthode des images magnétiques — au moyen d'une calculatrice électronique — soit par la méthode des ampère-tours résiduels détaillée, en considérant connue la valeur du courant dans l'enroulement de réglage. Les auteurs indiquent les résultats obtenus dans le cas réel analysé ; ils comparent les méthodes de calcul utilisées et tirent des conclusions sur les avantages et les erreurs de calcul afférents à chacune des deux méthodes appliquées.

BIBLIOGRAFIE

1. ST. GROSU, *Consideraţii cu privire la funcţionarea şi construcţia autotransformatorului de mare putere pentru reglarea tensiunii în reţele de transport de energie.* Electrotehnica, **8**, *4*, 118–123 (1961).
2. Г. Н. ПЕТРОВ, *Электрические машины.* ГЭИ, 1956.
3. W. KNAACK, *Efforts mécaniques exercés sur les déroulements de transformateurs en régime de court-circuit.* CIGRE, Rap. *135* (1956).
4. E. ROTH, *Etude analytique du champ de fuite de transformateurs et efforts mécaniques sur les enroulements.* RGC, **23**, 773 (1928).
5. M. F. SALGUE, M. B. HOCHART, *Contribution théorique et expérimentale au problème des efforts en court-circuit dans les transformateurs.* Bull. Soc. Française des Electriciens, **VIII**, *92*, 473–497 (1958).
6. J. KULDA, *Die Berechnung der Kurzschlusskräfte.* Bull. des schweizerischen elektrotechnischen Vereins, *20* (1958).
7. И. М. ПОСТНИКОВ, *О расчете электродинамических сил в обмотках трансформаторов.* Электричество, *8*, 9—15 (1947).
8. M. F. BEAVERS, C. M. ADAMS, *The Calculation and Measurement of Axial Electromagnetic Forces on Concentric Coils in Transformers.* Transactions AIEE, 467–478 (1959).
9. M. WATTERS, *The Measurement and calculation of axial electromagnetic forces.* Proc. of. Inst. El. Eng., **II**, *101*, 35–46 (1954).
10. C. APETREI, C. BĂLĂ, *Calculul şi determinarea experimentală a forţelor axiale de scurt-circuit brusc la transformatoare de putere.* Electrotehnica, **9**, *8*, 285–294 (1962).

STUDIUL ÎNCĂRCĂRII CU SARCINA APERIODICĂ A MOTOARELOR CU HISTEREZA ELECTROMECANICĂ

DE

MATEI MARINESCU

MEMBRU CORESPONDENT AL ACADEMIEI R.P.R.

621.313.292.011.1 : 538.23

ÎNCADRAREA ÎN LUCRĂRILE ANTERIOARE

În lucrările anterioare [1], [2] autorul a stabilit relații între parametrii mecanici și electrici pentru care are loc transferul de putere maxim, de la sursa de curent la sarcina mecanică, în sisteme electromecanice, cuplate prin forțe electromagnetice și în cazul cînd sistemul mecanic constituie un rezonator.

A arătat totodată că acest transfer de putere maxim corespunde unei rezonanțe complexe „electromecanice" în care intervine o frecvență proprie a sistemului „electromecanic", diferită de frecvența proprie a sistemului mecanic și caracterizată prin influența sarcinii mecanice în expresia frecevenței proprii „electromecanice".

De asemenea, acest efect de rezonanță are loc pentru alimentarea sistemului prin impulsuri dreptunghiulare de curent, separate prin intervale cel puțin egale cu durata impulsurilor — de unde și denumirea de „rezonanță electromecanică la impuls" dată acestei rezonanțe.

În prezenta lucrare autorul stabilește condițiile transferului de putere maxim, în același sistem electromecanic, în cazul cînd sistemul mecanic este un sistem aperiodic, constituit numai din masă m și rezistența de sarcină r.

Şi în acest caz teoria pune în evidenţă prezenţa unei frecvenţe proprii „electromecanice", pentru care are loc transferul de putere maxim. Este ceea ce vom denumi „rezonanţă electromecanică la impuls" pentru sarcină aperiodică.

Mă voi referi în cele ce urmează la schema de principiu a motorului electromagnetic din figura 1.

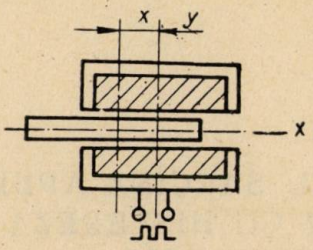


Fig. 1. — Motor electromagnetic cu mişcare alternativă de tip solenoidal

FORMULAREA PROBLEMEI

Vom formula problema care face obiectul prezentei lucrări, în modul următor :

dat fiind :

1. lucrul mecanic maxim disponibil, egal cu aria ciclului de „histereză" electromecanică maximă $\mathfrak{T}$;

2 — masa armăturii mobile — m —,

3 — cursa armăturii mobile $2x_m$,

4 — condiţiile la limită exprimate prin rapoartele dintre viteze, precum urmează :

$$k_r = \frac{v_r}{v_i} = \text{coeficient de reflexie}$$

unde : v_i = viteza „incidentă" la capetele cursei;

v_r = viteza „reflectată" la capetele cursei;

$$k_t = \frac{v_i}{v_m} = \text{coeficient de transmisie}$$

unde : v_m = viteza maximă, la mijlocul cursei.

Să se determine :

1. Sarcina, uniform repartizată : r;
2. Perioada mişcării : T;
3. Durata impulsului de curent θ;

pentru condiţia transferului maxim de putere, din circuitul electric în sistemul mecanic.

Observaţie. Se observă că k_r caracterizează extremităţile cursei din punct de vedere al şocului mecanic la aceste extremităţi. De asemenea k_t caracterizează fracţiunea din viteza maximă v_m care mai rămîne neutilizată la capetele cursei şi care rămîne disponibilă pentru şoc.

IPOTEZE INTRODUSE ÎN CALCUL

Pentru un *randament ridicat* vom presupune că :

$$k_t \ll 1$$

$$k_r \approx 1$$

ceea ce înseamnă că marea majoritate a energiei se consumă în rezistența utilă r și că ceea ce mai rămîne ca energie reziduală este reflectată total : șocul fiind perfect elastic.

SPECIFICAREA CALITATIVĂ A CONDIȚIILOR ÎN CARE ARE LOC TRANSFERUL MAXIM DE PUTERE ; CELE DOUĂ FAZE ALE MIȘCĂRII

În condițiile transferului maxim de putere, faza dintre impulsul de curent și viteză trebuie să fie aceea ilustrată în figura 2 — în care am reprezentat funcțiile : $i(t)$ și $v(t)$.

După cum se vede $v(t)$ se compune dintr-o succesiune de 2 faze și anume :

faza de „accelerare" $v_a(t) \quad 0 < t < \theta$,

faza de „frînare" $v_f(t) \quad \theta < t < \frac{T}{2}$.

În faza de accelerare *(a)* acționează forța electromagnetică datorită impulsului de curent. În faza de frînare *(f)*, frînarea este datorită rezistenței de sarcină r.

Pentru oricare altă poziție relativă dintre $i(t)$ și $v(t)$ decît aceea ilustrată în figura 2 lucrul mecanic efectuat va fi mai mic, deoarece în faza de „frînare" intervine pe lîngă frînarea datorită sarcinii r și frînarea datorită forței electromagnetice a curentului — aplicată armăturii mobile.

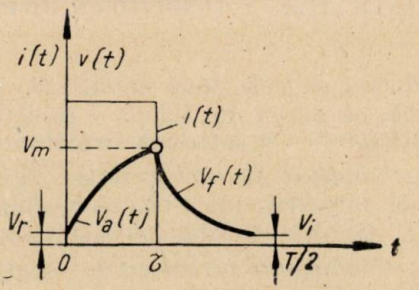


Fig. 2. — Oscilograma curentului și a vitezei armăturii mobile, a motorului din figura 1, pentru condiția transferului maxim de putere : „rezonanța electromecanică, la impuls, pentru sarcina aperiodică".

ECUAȚIILE MIȘCĂRII ÎN CELE DOUĂ FAZE

Ecuațiile care definesc mișcarea, cu sarcină uniform repartizată, în cele 2 faze sînt :

în faza a

$$m \frac{dv_a}{dt} + r.v_a = F \qquad (1)$$

în faza j

$$m\frac{dv_f}{dt} + r.v_f = 0 \tag{2}$$

Soluțiile acestor ecuații sînt :

$$v_a(t) = \frac{v_r}{1-k}(1 - ke^{-\alpha t}) \qquad (0 < t < \theta) \tag{3}$$

$$v_f(t) = v_m e^{-\alpha(t-\theta)} \qquad \left(\theta < t < \frac{T}{2}\right) \tag{4}$$

unde

$$\alpha = \frac{r}{m} \; ; \; k = 1 - \frac{r}{F}v_r. \tag{5}$$

Expresia lui k se mai poate scrie, ținînd cont de faptul că :

$$\sigma = \int_0^\theta F v_a(t)\,dt = F\int_0^\theta v_a(t)\,dt = F.\,x_m \tag{6}$$

$$k = 1 - \frac{r.x_m}{\sigma}v_r.$$

FORMULAREA CONDIȚIILOR PENTRU O SOLUȚIE PERIODICĂ UNICĂ. SPECIFICAREA CANTITATIVĂ A CONDIȚIILOR TRANSFERULUI MAXIM DE PUTERE

Pentru ca cele două ecuații (1) și (2) să admită o singură soluție, periodică, ca aceea din fig. 2 — soluțiile (3) și (4) din cele două faze ale mișcării trebuie să satisfacă următoarele condiții :

1. *Condiția de continuitate* : vitezele, la momentul θ pentru cele 2 faze ale mișcării, adică viteza la sfîrșitul fazei „a" și viteza la începutul fazei „f" trebuie să aibă aceeași valoare.

2. *Condiția de periodicitate* : spațiile parcurse în cele 2 faze (în timpurile θ și $\left(\frac{T}{2} - \theta\right)$, respectiv) au aceeași valoare egală cu x_m.

3. *Condiția la limită* : viteza la sfîrșitul fazei $f\left(p.\,t = \frac{T}{2}\right)$ este egală cu v_i.

Observații : Condiția la limită pentru $t = 0$, cînd $v = v_r$, este explicitată în (3) astfel după cum se vede imediat.

Cele 3 condiții specificate mai sus ne dau 4 ecuații. (Condiția 2° ne dă 2 ec.) între variabilele : r, θ, T și k ceea ce ne permite rezolvarea problemei enunțate la început.

FORMAREA ECUAȚIILOR DE CONDIȚIE

— Condițiile 1° și 3° ne dau ecuațiile :

$$v_m = \frac{v_r}{1-k}(1 - k\,e^{-\alpha\theta}) \tag{7}$$

$$v_i = v_m\, e^{-\alpha\left(\frac{T}{2}-\theta\right)}. \tag{8}$$

Eliminînd pe v_m și k între (7), (8), și (6) și introducînd parametrii k_r și k_t, definiți mai sus, obținem ecuațiile :

$$\frac{m\,\mathfrak{G}}{r^2 x_m^2} = \frac{1 - k_r\, e^{-\alpha\frac{T}{2}}}{(1-k_t)\left(1 - k_t^{-1}\, e^{-\alpha\frac{T}{2}}\right)} \tag{9}$$

$$k_t = e^{-\alpha\frac{T}{2}}\, e^{\alpha\theta}. \tag{10}$$

Punînd în ecuația (9) :

$$\Omega = \sqrt{\frac{K}{m}},\quad K = \frac{F}{x_m}$$

obținem :

$$\frac{\Omega^2}{\alpha^2} = \frac{1 - k_r\, e^{-\alpha\frac{T}{2}}}{(1-k_t)\left(1 - k_t^{-1}\, e^{-\alpha\frac{T}{2}}\right)} \tag{11}$$

Făcînd în (11) și (10) schimbările de varabile definite de relațiile :

$$e^{-\alpha\frac{T}{2}} = x \tag{12 a}$$

$$e^{-\alpha\theta} = y \tag{12 b}$$

obținem :

$$\frac{\Omega^2}{\alpha^2} = \frac{1 - k_r x}{(1-k_t)(1 - k_t^{-1} x)} \tag{13}$$

$$k_t = \frac{x}{y}. \tag{14}$$

Eliminînd pe x între (13) și (14) obținem :

$$\frac{\Omega^2}{\alpha^2} = \frac{1 - k_r k_t y}{(1-k_t)(1-y)}. \tag{15 a}$$

Sau forma aproximativă (vezi ipoteze de calcul formulate la început)

$$\frac{\Omega^2}{\alpha^2} = \frac{1}{1-y} \tag{15 b}$$

— Condiția 2° ne dă ecuațiile :

$$x_m = \int_0^\theta v_a \, dt = \int_\theta^{T/2} v_f \, dt .$$

Făcînd înlocuirile, obținem :

$$x_m = \frac{v_r}{1-k} \int_0^\theta (1 - k\, e^{-\alpha t})\, dt = v_m \; e^{\alpha\theta} \int_\theta^{\tau/2} e^{-\alpha t} \, dt$$

sau :

$$x_m = \frac{\tau}{r \cdot x_m} \left[\theta - \frac{k}{\alpha} (1 - e^{-\alpha\theta}) \right] = \frac{v_m}{\alpha y} [y - x].$$

Ceea ce ne dă ecuațiile :

$$\frac{v_m}{x_m} = \frac{\alpha}{1 - k_t} \tag{16}$$

$$\frac{\alpha^2}{\Omega^2} = \alpha\theta - k(1 - y) . \tag{17}$$

În baza ecuațiilor (15 b), (16) și (17) vom avea în definitiv următorul sistem de 3 ecuații

— forma aproximativă $v_m = \alpha\, x_m$ (18)

și

$$z^2 = 1 - y = -\ln y - k(1 - y) \tag{19 a}$$

unde am pus :

$$z = \frac{\alpha}{\Omega} < 1 . \tag{19 b}$$

Eliminînd pe x_m între (6) și (18) obținem pentru k expresia :

$$k = 1 - z^2 \frac{k_r k_t}{1 - k_t} \approx 1 .$$

Astfel încît ec. (19) devin

$$z^2 = 1 - y = -\ln y - (1 - y) . \tag{19 c}$$

De unde ecuațiile în y :

$$2(1 - y) = -\ln y = \ln \frac{1}{y} \tag{20 a}$$

și deci :

$$y = 0{,}2 \tag{20 b}$$

$$z = \sqrt{1 - y} = 0{,}89 \tag{21}$$

şi în baza ec. (14)

$$x = k_t y = 0{,}2k_t. \tag{22}$$

Revenind în baza formulelor (12 a), (12 b) şi (19 b) la variabilele „primare" vom avea formulele:

$$\alpha = z.\ \Omega = 0{,}89\ \ \Omega \tag{23 a}$$

şi

$$r = zm\ \Omega = \frac{0{,}89}{x_m}\sqrt{m\sigma} \tag{23 b}$$

$$T_e = -\frac{\ln\ k_t \cdot y}{z\ \Omega} \tag{24}$$

$$\theta = -\frac{1}{z\ \Omega}\ln y \tag{25}$$

$$\frac{\theta}{T_e} = \frac{\ln y}{\ln k_t.y} = \frac{1}{1 + \dfrac{\ln k_t}{\ln y}} \tag{26}$$

INTERPRETAREA RELAŢIILOR 23–26

Observăm, în primul rînd că, în toate aceste formule intervine parametrul „derivat":

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{\sigma}{m\,x_m^2}}$$

care depinde de parametrii primari electromecanici ai sistemului şi care are dimensiunile unei frecvenţe.

El defineşte ceea ce vom denumi frecvenţa proprie „electromecanică" a acestui sistem.

Ecuaţia (25) exprimă astfel că durata θ a impulsului trebuie să fie acordată pe perioada proprie $1/\Omega$ a sistemului „electromecanic" iar ecuaţia (26) ne arată că această durată raportată la perioada T_e a impulsurilor de curent este egală cu 0,5 cînd $k_t = y = 0{,}2$ şi mai mică sau mai mare decît 0,5 după cum $k_t < 0{,}2$ sau $k_t > 0{,}2$, respectiv.

În cazul cînd $k_t = \dfrac{v_i}{v_m} = 0{,}2$, înseamnă că 4% din energia cinetică a armăturii rămîne disponibilă la capetele cursei.

În sfîrşit, ecuaţia (23) combinată cu ecuaţia (18) ne dă relaţia dintre amplitudinea vitezei şi deplasării: $v_m = 0{,}89\ \ \Omega\, x_m$.

Pe de altă parte, ecuaţia (25) se poate scrie:

$$\theta = \frac{\ln y}{z}\, x_m \sqrt{\frac{m}{\sigma}} = 1{,}8\ x_m \sqrt{\frac{m}{\sigma}} \tag{27}$$

Sau încă, referindu-ne la relațiile (18), (19 b) (23) și (25) obținem

$$\mathfrak{G} = \frac{\ln^2 y}{z^2} m \frac{x_m^2}{\theta^2} = \frac{2}{z^2} \frac{1}{2} m \; v_m^2 = 2{,}5 \frac{1}{2} m v_m^2 \qquad (28)$$

ceea ce ne indică următorul bilanț energetic al procesului transformării energiilor în aceste motoare, în timpul unei perioade a impulsului de curent și în cazul unei sarcini rezistive, aperiodice. În faza de accelerare, energia disponibilă $\mathfrak{G}$ a ciclului de h.e.m. trece o parte în energie cinetică, iar restul adică 0,5 din aceasta în lucru mecanic efectiv. În faza de frînare, toată energia cinetică comunicată masei în prima fază, trece în lucru mecanic efectiv.

CONCLUZII

După cum se vede, rezultatele analizei de mai sus ne pun în posesia soluției problemei formulată la început ; mai apar și următoarele informații suplimentare :

— dacă sarcina r și durata impulsului θ sînt determinate univoc, frecvența impulsurilor $f_e = 1/T_e$ depinde de k_t care este arbitrar, dar în orice caz mai mic ca unitate. Dacă însă ne dăm și condiția ca durata θ a impulsurilor să fie egală cu durata intervalelor dintre impulsuri, atunci rezultă că $T_e = 2\,\theta$ și $k_t = 0{,}2$ și deci energia disipată în șocuri, la capetele cursei este 4% din energia cinetică maximă pe ciclu.

ÉTUDE DE LA CHARGE APÉRIODIQUE DES MOTEURS À HYSTÉRÉSIS ÉLECTRO-MÉCANIQUE

RÉSUMÉ

En continuation de ses travaux antérieurs, l'auteur montre que, dans les systèmes électro-mécaniques couplés par des forces électromagnétiques et où le système mécanique couplé est constitué par une masse et une charge résistive, uniformément répartie, il y a, comme dans le cas où le système mécanique constitue un résonateur, une « fréquence propre » électro-mécanique telle que, si la fréquence des impulsions est « accordée » sur cette fréquence propre, le travail effectué est maximum.

Ces systèmes électro-mécaniques fonctionnent comme des moteurs électromagnétiques à mouvement alternatif, dont l'armature mobile oscille en synchronisme à une fréquence égale à la moitié de la fréquence des impulsions, *en l'absence des ressorts*, l'amplitude de l'armature étant maximum lorsque la fréquence des impulsions est « accordée » sur la fréquence propre, *électro-mécanique*, du système.

Au point de vue physique, l'accord a lieu seulement lorsque, dans la phase d'accélération de l'armature, le rapport entre le travail produit par le moteur et l'énergie cinétique, à la fin de la phase d'accélération, est égal à 0,5 et que, dans la phase de freinage, toute cette énergie cinétique est transformée, pratiquement, en travail.

BIBLIOGRAFIE

.1. M. MARINESCU, *Asupra teoriei rezonanței la impuls și aplicația la motoare cu histereza electro-mecanică și mișcare alternativă.* Comunic. Acad. R.P.R., *10* (1962).
2. — *Asupra unei generalizări a noțiunii de rezonanță și aplicarea la dezvoltarea unei noi tehnici de producere a ultrasunetelor.* St. cerc. energ., Seria A *2*(1963)

COMPENSAREA REGIMULUI DEFORMANT LA INSTALAŢII DE REDRESARE ECHIPATE CU BATERII DE CONDENSATOARE

I. EFECTELE ARMONICILOR ŞI MIJLOACE PENTRU DIMINUAREA LOR

DE

C. BĂLĂ, M. POMÎRLEANU şi M. BÎRGĂUANU

621.316.264.018. 3 : 621.319.4.016.44

Studiul fenomenelor deformante din sistemele electroenergetice a început acum cîteva decenii în ţara noastră prin cercetările inedite întreprinse de prof. C. Budeanu. După definirea puterii deformante s-au examinat influenţele acestor regimuri asupra funcţionării aparatelor de măsură şi instalaţiilor energetice [1], [2], [3], domenii în care electroenergetica din ţara noastră a înregistrat rezultate originale.

Fenomenele deformante capătă în prezent o importanţă deosebită în sistemele electroenergetice moderne ; astfel în ţara noastră, o dată cu dezvoltarea sistemului electroenergetic, a crescut şi complexitatea sa ; pe lîngă aparatele şi receptoarele utilizate pînă în prezent capătă o importanţă mereu crescîndă instalaţiile de redresare comandate sau simple pentru producerea curentului continuu necesar acţionării în curent continuu din industrie şi tracţiune electrică, pentru procesele tehnologice din industria chimică etc. Puterea acestor instalaţii din sistemul energetic este cuprinsă între 1 şi 50 MW ; în viitor vor apărea probabil în sistem instalaţii de redresare de puteri şi mai mari.

Datorită armonicilor care apar în curba curentului absorbit de aceste aparate, în sistemul energetic se produc fenomene nedorite cum sînt : pierderi majorate în reţele datorită puterii aparente majorate, pierderi suplimentare şi cupluri parazite în maşinile electrice care se produc dato-

rită armonicilor din curba tensiunii reţelei, supratensiuni de rezonanţă pe anumite armonici, erori la aparatele de măsură şi control, perturbaţii în reţele de telecomunicaţii şi telemăsură etc.

De obicei, aceste instalaţii de redresare funcţionează în regim inductiv, luînd de la reţea o putere reactivă considerabilă. Una din soluţiile pentru compensarea locală a puterii reactive o constituie după cum se cunoaşte instalarea unei baterii de condensatoare. Adoptarea acestei soluţii fără o examinare detaliată a circuitelor rezonante nedorite ce se formează la diferitele frecvenţe armonice, poate conduce la apariţia unor curenţi mari prin reţeaua de alimentare, la pierderi şi la apariţia unor tensiuni mai mari decît cele admisibile la bornele bateriei de condensatoare.

Pentru limitarea sau micşorarea valorilor armonicilor din curba curentului prin reţeaua de alimentare se adoptă diferite metode, dintre care cele principale sînt:

— în cazul redresoarelor monofazate necomandate se recurge fie la combinarea a două cîte două redresoare, fie la conectarea în punte a redresoarelor, pentru a rezulta o utilizare simetrică pe ambele alternanţe ale curbei tensiunii;

— în cazul redresoarelor polifazate se utilizează scheme de multiplicare a numărului de faze, rezultînd astfel o reducere a amplitudinii armonicilor din curba curentului şi o creştere a ordinului de la care pot să apară aceste armonici.

Evident o multiplicare exagerată a numărului de faze, de la 12 în sus, este mult prea costisitoare mai ales atîta timp cît pentru a reduce conţinutul în armonici din sistem sînt şi alte căi mai ieftine. De observat însă că, chiar la utilizarea unui număr de faze ridicat, la redresoarele comandate pot apărea subarmonici în raport cu cele care se produc la redresoarele necomandate; prin urmare la redresoarele comandate eficienţa multiplicării numărului de faze este redusă.

— o metodă eficientă pentru reducerea efectelor armonicilor constă în prevederea de filtre electrice prin care se evită închiderea armonicilor din curba curentului prin reţeaua de alimentare.

Primele două metode realizează direct o micşorare a armonicilor curentului spre deosebire de ultima care are în vedere numai scurtcircuitarea acestor armonici prin circuite rezonante montate la bornele instalaţiei de redresare. Problema se complică şi trebuie luate măsuri suplimentare, cînd chiar în curba tensiunii de alimentare apar armonici, datorită altor receptoare deformante.

În prezenta lucrare, după ce se expun relaţiile de calculul parametrilor circuitelor rezonante, se analizează soluţiile propuse pentru evitarea închiderii armonicilor prin reţeaua de alimentare în cîteva cazuri concrete din sistemul electroenergetic din ţara noastră.

Din măsurătorile efectuate rezultă că instalaţiile examinate funcţionează în regim inductiv; pentru îmbunătăţirea factorului de putere, instalaţiile studiate urmează să fie echipate şi cu baterii de condensatoare. De aceea în consideraţiile care urmează se are în vedere prezentarea unei soluţii tehnice cu utilizarea bateriei de condensatoare destinată compensării puterii reactive şi pentru realizarea circuitelor rezonante de scurt-

circuitare a armonicilor din curba curentului, respectiv utilizarea bobinelor de reactanță pentru limitarea curenților de șoc care apar la conectarea bateriei la rețeaua de alimentare.

Întrucît nu s-au constatat armonici în curbele tensiunilor oscilografiate la barele de alimentare cu instalațiile de redresoare deconectate, în lucrarea de față nu se examinează circuitele rezonante ce pot să apară pentru armonicile produse de alte receptoare din sistem și care trebuie evitate.

1. Considerații teoretice privind schemele tipice ale rețelelor cu instalații de redresare și baterii de condensatoare

În rețelele electrice caracterizate printr-o reacție neglijabilă a regimului deformant provocat de instalația de redresare, curba tensiunii la

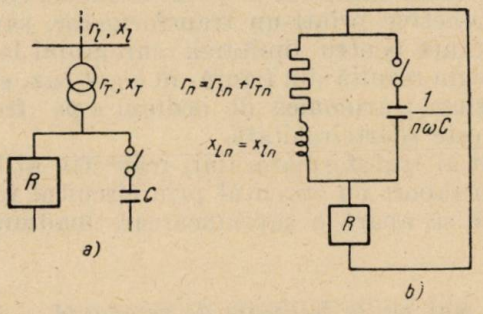


Fig. 1. — *a*) O schemă tipică de instalație a unui redresor dotat cu condensatoare pentru ameliorarea factorului de putere ; *b*) schema echivalentă a instalației de la punctul a, pentru armonica de ordinul *n* a curentului.

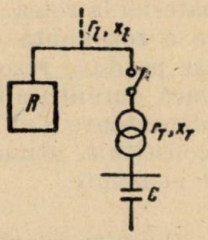


Fig. 2. — O altă schemă tipică cu un redresor.

bare nu conține armonici, iar amplitudinea armonicilor din curba curentului depinde practic numai de schema de conexiuni și regimul de sarcină al redresorului. Prin urmare redresorul se poate reprezenta în circuitul electric echivalent pentru diferitele armonici printr-o sursă de curent constant, de impedanță internă neglijabilă [4], [5].

Această reprezentare de obicei se extrapolează și pentru cazul limită al existenței rezonanței paralel pentru o anumită armonică, deoarece se obțin de obicei valori acoperitoare pentru curenți. Alte reprezentări [7] care dau valori mai exacte ale curenților în condiții de rezonanță sînt mai complicate și deci greu de aplicat.

În figura 1 *a* și 2 sînt reprezentate cîteva scheme tipice de rețele electrice în care sînt conectate redresoare și baterii de condensatoare pentru compensarea puterii reactive.

a. *Circuite cu rezonanță de curent*

În figura 1 *a*, bateria de condensatoare este conectată direct la barele de alimentare ale redresorului ; schema echivalentă corespunzătoare armonicii *n* este reprezentată în figura 1 *b* în care mărimile notate cu indicele

n se referă la parametrii circuitului la frecvenţa acestei armonici. După cum rezultă din figură, cînd frecvenţa uneia dintre armonici coincide cu frecvenţa de rezonanţă a circuitului apare o rezonanţă de curent în cele două laturi conectate în paralel.

Datorită curentului mare de frecvenţă egală cu frecvenţa de rezonanţă se produce supratensionarea bateriei şi pierderi suplimentare în dielectricul condensatorului la frecvenţa ridicată a armonicii.

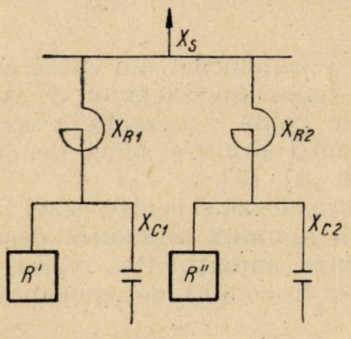
b. *Circuite cu rezonanţă de tensiune*

În figura 2, bateria de condensatoare este conectată la barele de alimentare ale redresorului prin intermediul unui transformator sau în serie cu o bobină de reactanţă. Este cazul bateriilor de joasă tensiune, conectate pentru compensarea puterii reactive printr-un transformator, sau cazul utilizării unei bobine de reactanţă pentru limitarea curentului la conectarea bateriei la reţea. După cum rezultă din figură, în acest caz, se poate produce o rezonanţă de tensiune; armonica de ordinul n pe frecvenţa căreia se produce rezonanţa este scurtcircuitată.

Dacă curenţii admisibili ai transformatorului, respectiv ai bateriei de condensatoare sînt mici în raport cu curentul prin circuitul rezonant astfel constituit, atunci poate să apară o supraîncărcare inadmisibilă a acestor elemente.

c. *Circuite complexe cu mai multe frecvenţe de rezonanţă*

Un alt caz care poare să apară în practică corespunde schemei din figura 3, în care sînt în funcţiune două instalaţii de redresoare şi se doreşte



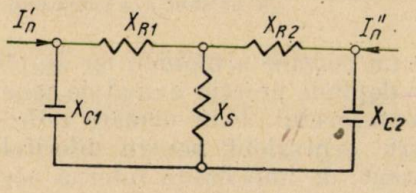


Fig. 3. — Schema unei instalaţii cu redresoare în paralel compensate separat.

Fig. 4. — Schema echivalentă a instalaţiei de la figura 3.

montarea pe fiecare secţie de bare a cîte unei baterii de condensatoare. Reprezentînd instalaţiile de redresoare ca generatoare de curent constant se pot găsi pentru schema echivalentă corespunzătoare din figura 4, următoarele frecvente pentru care poate

$+ X_{R_2}) + X_{R_1} X_{R_2}].$

În toate cazurile întîlnite în practică un rol important îl îndeplinește rezistența echivalentă a liniei și a transformatorului; de observat că valoarea rezistenței la un reactor respectiv la un transformator dat crește cu frecvența datorită refulării curentului.

O problemă dificilă în evaluarea gravității rezonanței derivație (fig. 1), sau importanța rezonanței serie (fig. 2) în precizarea ordinului armonicii pe care poate apărea fenomenul de rezonanță o reprezintă determinarea parametrilor sistemului.

Pentru a evita o rezonanță derivație pe vreuna din armonicile de ordin mai mic decît n în schemele cu bateria de condensatoare conectată la bornele redresorului, cînd rezistența liniei este neglijabilă este necesar ca puterea de scurtcircuit a sistemului $S_{sc} = \frac{U^2}{X_l}$ și puterea reactivă $Q_C = \frac{U^2}{X_C}$ să îndeplinească relația

$$Q_C \ll \frac{1}{n^2} S_{sc};$$

de obicei, armonicile de ordin mai mare decît $n = 15$ sînt neglijabile și rezultă $Q_C \ll 0{,}005\ S_{sc}$. De cele mai multe ori această condiție este departe de a fi îndeplinită.

Prin urmare conectarea unei baterii de condensatoare la barele unui receptor deformant fără a se lua măsuri suplimentare poate să accentueze deformarea curbei curentului și chiar a tensiunii, iar funcționarea bateriei de condensatoare este periclitată datorită supratensiunilor și încălzirilor suplimentare.

2. Filtre electrice pentru diminuarea armonicilor din curentul de linie

Exceptînd cazul limită al redresoarelor monofazate ideale la care prin conectarea redresoarelor se poate ajunge ca în curba curentului de linie să nu mai apară armonici datorită redresorului, la o instalație cu redresoare comandate acest fapt nu se poate evita. Unica soluție care rămîne în acest caz este de a scurtcircuita aceste armonici prin circuite rezonante denumite filtre electrice, conectate chiar la barele de alimentare ale redresorului. Filtrele electrice pot fi realizate separat de bateria de condensatoare, sau pot include în circuitul lor și bateria de condensatoare.

a. *Filtre electrice separate*

O asemenea soluție se adoptă pentru compensarea fenomenelor perturbatoare provocate de regimul deformant de pe o linie din sistem asupra telecomunicațiilor și telemăsurilor, precum și în cazul armonicilor de ordin redus ($n < 5$) [6]. Filtrul constă dintr-un condensator în serie cu o bobină de reactanță. Inevitabil, circuitul are și o rezistență. Condițiile pe care trebuie să le îndeplinească filtrul sînt următoarele:

— frecvența de rezonanță a filtrului trebuie să fie egală cu frecvența armonicii de ordinul n din curba curentului care trebuie scurtcircuitată.

Notînd cu L-inductivitatea bobinei de reactanţă şi C-capacitatea condensatorului rezultă

$$LC = \frac{1}{n^2\,\omega^2},$$

— rezistenţa r_n a circuitului electric al filtrului trebuie să fie mult mai mică decît impedanţa de scurtcircuit z_{scn} a sistemului în punctul respectiv.

$$\frac{r_n}{z_{scn}} \ll 1.$$

b. *Filtre electrice înglobînd bateria de condensatoare*

Această soluţie este de cele mai multe ori utilizată la instalaţiile de putere cu redresoare comandate, echipate cu baterii de condensatoare pentru compensarea puterii reactive.

Avînd în vedere faptul că bateriile de condensatoare sînt realizate în prezent din unităţi de cel mult 25 ÷ 50 KVAR şi că fabricile constructoare asigură fiecare element pentru o funcţionare de durată la o tensiune mai mare cu 5÷10% faţă de tensiunea nominală, pentru obţinerea capacităţii necesare se conectează în serie şi respectiv în paralel mai multe unităţi. Prin urmare, bateria de condensatoare de pe o fază se poate dispune potrivit în grupe formate din mai multe unităţi, în vederea obţinerii mai multor circuite rezonante serie pentru scurtcircuitarea diferitelor armonici (fig. 5).

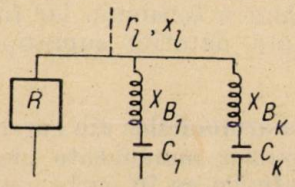


Fig. 5. — Compensarea regimului deformant prin mai multe filtre realizate prin gruparea convenabilă a condensatoarelor.

În serie cu o grupă din bateria de condensatoare se conectează bobina de reactanţă avînd un dublu scop:

— împreună în grupa de condensatoare formează un circuit rezonant serie, acordat pe frecvenţa unei armonici;

— limitează curentul de încărcarea bateriei de condensatoare la conectarea acesteia la reţea.

Reactanţa bobinei din ramura k se determină din condiţia de rezonanţă a circuitului în funcţie de ordinul n al armonicii, de tensiunea nominală U_n a barelor şi puterea reactivă U_{ck} a grupei de condensatoare

$$X_L = \frac{U_n^2}{n^2 \cdot Q_{Ck}}.$$

Puterea reactivă debitată de acest circuit la reţea creşte în cazul circuitului serie de la $\sum_k Q_{Ck}$ (în care k este ordinul grupei de condensatoare) la

$$Q = \sum_k \frac{n^2}{n^2-1} Q_{Ck}.$$

Fundamentala tensiunii la bornele grupei k de condensatoare crește față de tensiunea nominală U_n a barelor cu

$$\Delta U_{Ck} = \frac{U_n}{n^2 - 1}.$$

Pentru a îndeplini condiția impusă de fabricile constructoare și fără a recurge la conectarea în serie a mai multor condensatoare pentru reducerea tensiunii la borne rezultă că

$$\frac{\Delta U_{Ck}}{U_n} < 0{,}05, \text{ respectiv } \frac{\Delta U_{Ck}}{U_n} < 0{,}1.$$

Ținînd seama de relația precedentă, se determină astfel ordinul minim al armonicii pentru care este posibilă realizarea economică a unui filtru

$$n > \sqrt{21}, \text{ respectiv } n > \sqrt{11};$$

prin urmare prin asemenea scheme se pot scurtcircuita practic armonicile de la ordinul 5 în sus.

Impedanța Z_k a fiecărui circuit rezonant este inductivă pentru armonicile de ordin mai mare decît ordinul armonicii pe care are loc rezonanța și este capacitivă pentru armonici de ordin mai mic.

În figura 6, este reprezentat raportul Z_k / X_C al circuitelor rezonante în funcție de ordinul armonicii. Urmează ca apoi să se verifice posibilitatea de formare a unui circuit rezonant derivație pe armonicile de ordin inferior circuitelor rezonante cu circuitul rețelei.

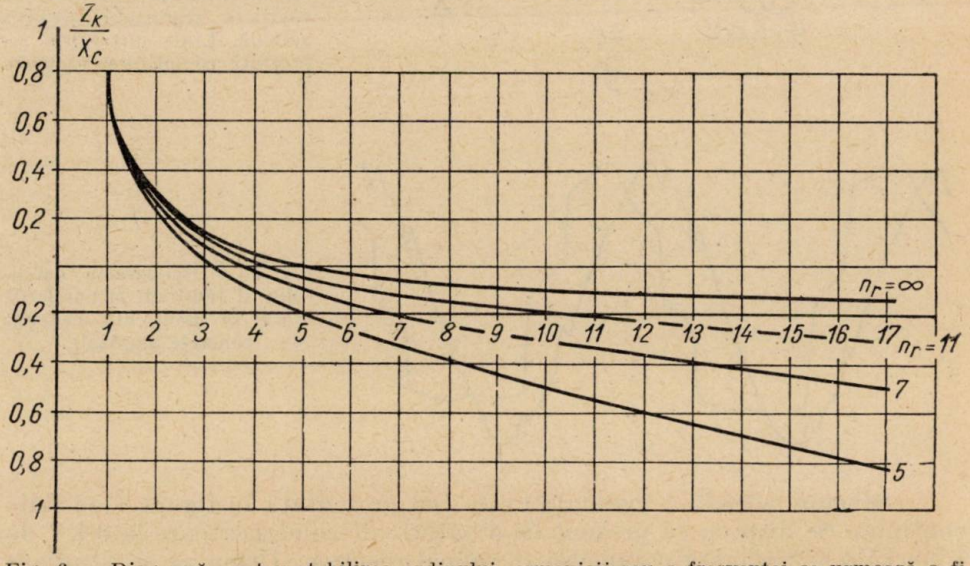


Fig. 6. — Diagramă pentru stabilirea ordinului armonicii sau a frecvenței ce urmează a fi compensată.

De asemenea trebuie verificat în condiţiile date, ca grupa respectivă din bateria de condensatoare care scurtcircuitează curentul de armonică n să nu fie supraîncărcată în urma creşterii valorii efective a curentului.

Deoarece numărul de grupe care se poate forma cu condensatoarele unei baterii este limitat, se poate adopta de la caz la caz şi soluţia cu circuite rezonante pe frecvenţa intermediară frecvenţelor a două armonici.

În sfîrşit, pentru a limita curentul de şoc la conectarea bateriei la reţea pînă la o fracţiune σ din curentul de scurtcircuit al reţelei pe barele de alimentarea ale redresorului, trebuie ca reactanţa bobinei să îndeplinească condiţia

$$X_B > \left(\frac{1}{\sigma} - 1\right) X_l ;$$

reactanţa bobinei trebuie să rămînă constantă pînă la valoarea maximă a curentului de scurtcircuit. Această ultimă condiţie impune realizarea bobinelor de reactanţă cu întrefier mare sau cu aer, pentru a se evita apariţia fenomenului de saturaţie.

3. Aplicaţii

a) La o uzină chimică se foloseşte un grup de redresoare care alimentează un arc electric folosit la cracarea gazului metan.

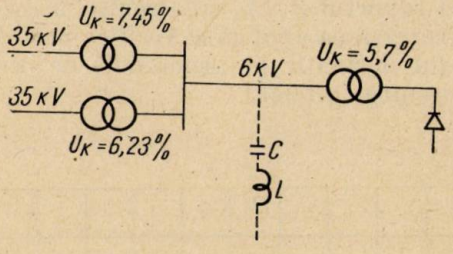


Fig. 7. — Schema practică a alimentării redresoarelor de la una din uzinele chimice. Linia continuă reprezintă situaţia actuală. Linia întreruptă reprezintă completarea propusă.

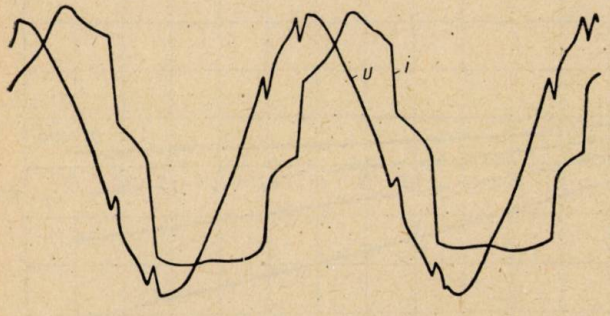


Fig. 8. — Oscilograma curentului şi tensiunii la barele de 6 kV în unul din cazurile concrete analizate.

Schema actuală a instalaţiei este cea prezentată în figura 7 cu linie continuă. Se dispune în prezent de o baterie de condensatoare la 6 kV de 1500 kVAR destinată compensării puterii reactive. Urma să se studieze posibilitatea şi oportunitatea compensării puterii deformante.

Oscilogramele curenților și tensiunilor pe barele de 6 kV la sarcini variabile ale redresoarelor, determinate de arcul electric din reactorul de cracare a gazului metan, sînt date în figura 8.

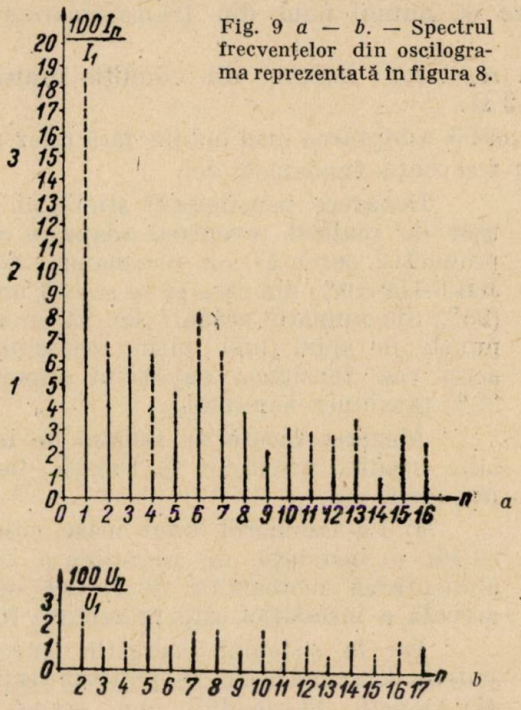


Fig. 9 *a* — *b*. — Spectrul frecvențelor din oscilograma reprezentată în figura 8.

Efectuînd analiza armonică rezultă că amplitudinea diferitelor armonici și ponderea lor nu se păstrează constantă ci variază în timp funcție de procesele care au loc în reactor (pe unul din electrozi au loc depuneri, iar gazul metan nu are parametrii constanți). Limitele între care variază amplitudinile acestor armonici sînt mari, de exemplu armonica 5 variază între 1,6 și 6,5 % (vezi fig. 9).

În această situație filtrarea unui număr restrîns de armonici, de exemplu a armonicilor 5, 7, 11, 13 este insuficientă mai ales dacă se ține seama de faptul că armonicile sub 5 au o pondere mare și de faptul că apar și armonici pare (astfel armonica 2 din curba curentului variază între 10,5 și 19%).

Pe de altă parte gruparea condensatoarelor existente, astfel încît ramurile să constituie filtre pentru diverse armonici, este limitată. De aceea, nu este posibilă filtrarea tuturor armonicilor importante. În această situație soluția propusă constă în a înseria pe fiecare fază a bateriei cîte o bobină de reactanță care să aibă pe de o parte rolul de a limita șocul de curent la conectarea bateriei la rețea, iar pe de altă parte de a îndeplini parțial și rolul de filtru. Schema de conectarea bobinei în serie cu condensatoarele este reprezentată punctat în figura 7.

Calculele efectuate cu valorile concrete ale instalaţiei din figura 7 au condus la

— valoarea reactanţei minime (din condiţia limitării curentului de şoc în ipoteza că numai unul din transformatoare este conectat) $X_{B\min} = 0{,}83\ \Omega$;

— valoarea reactanţei maxime din condiţia limitării creşterii tensiunii $X_{B\max} = 1{,}2\ \Omega$.

S-a propus astfel, adoptarea unei bobine fără miez de fier, cu o reactanţă de 1 Ω la frecvenţa fundamentalei.

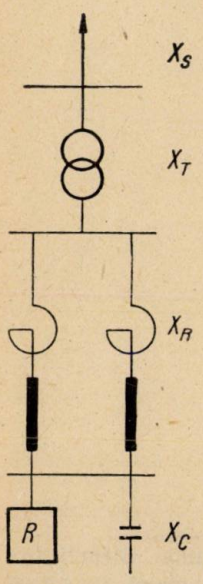


Fig. 10. — Schema de principiu a staţiei de redresare studiată în aplicaţia nr. 2.

Deoarece beneficiarul studiului solicită o soluţie uşor de realizat (eventual adaptare a unor bobine din producţia curentă) s-a recomandat folosirea bobinelor RB 6-150-10% din care să se scoată un număr de spire (28% din numărul actual) sau să se ia priză la acest număr de spire (mai puţin recomandabil întrucît în acest caz tensiunea capătului superior depăşeşte cu 28% tensiunea nominală).

Alegerea făcută ne asigură de îndeplinirea celorlalte condiţii privitoare la izolaţie, încălzire, rezistenţă mecanică etc.

b) La laminorul unui mare combinat siderurgic există o instalaţie de redresare a curentului pentru alimentarea motoarelor de curent continuu. Schema actuală a instalaţiei este prezentată în figura 10.

De la sistemul energetic (caracterizat printr-o putere de scurtcircuit în punctul respectiv de $S_{sc} \cong 800$ MVA) prin intermediul unui transformator coborîtor de 20 MVA (110/6 kV $u_k = 10{,}5\%$) şi a 2 cabluri prevăzute cu reactoare pentru limitarea curenţilor de scurtcircuit (RB—6, 1 000 A, 10%) se alimentează instalaţia de redresoare cu o putere aparentă de aproximativ 5 MVA. Deoarece factorul de putere este mic se doreşte pentru îmbunătăţirea sa, montarea unei baterii de condensatoare care în prima etapă să însumeze 2,88 MVAR iar într-o etapă ulterioară 4,32 MVAR. Oscilogramele curenţilor şi tensiunilor (fig. 11 *a*, *b*) şi analizele armonice efectuate în două regimuri diferite de funcţionare (fig. 12) indică existenţa unor deformări puternice în special în curbele curenţilor. În aceste condiţii trebuia stabilit ce se va întîmpla cu bateria dacă se va monta direct la bare şi de asemenea care sînt soluţiile care să permită în cazul unor solicitări inadmisibile montarea ei.

Utilizînd schema din figura 1 *b*, se poate găsi că în cazul bateriei de 2,88 MVAR, rezonanţa se produce la frecvenţa

$$f = 50\sqrt{\frac{X_C}{X_S + X_T + X_{R/2}}} = 50\sqrt{\frac{4\,200}{130{,}5}} = 5{,}65\ .\ 50\ \text{Hz},$$

iar în cazul bateriei de 4,32 MVAR

$$f = 50\sqrt{\frac{2\,800}{130,5}} = 4,62\ .\ 50\ \text{Hz}.$$

Deci ambele situații indică posibilitatea unei rezonanțe de curent pe armonica 5.

În această situație, armonica 5 din curba curentului bateriei de condensatoare va fi :

$$I_{C5} = \frac{X_{e5}}{R_{e5}} I_5 = 24\, I_5,$$

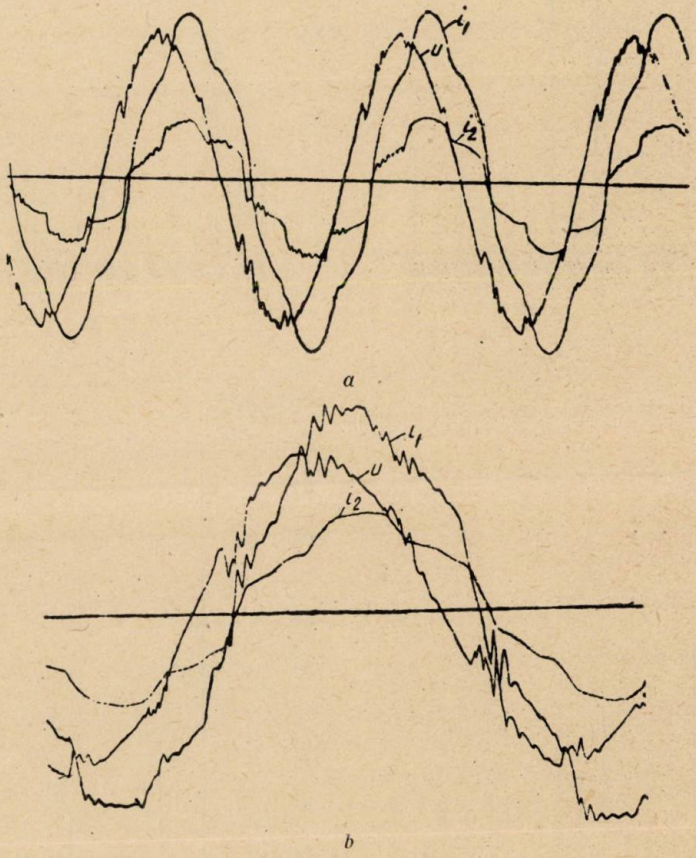


Fig. 11. — Oscilogramele tensiunilor și curenților în două regimuri de lucru ale laminorului :
a) se laminează sîrma ∅ = 5 ;
b) ,, ,, ,, ∅ = 10.

unde I_5 este valoarea efectivă a armonicii 5, din curba curentului debitat de redresor iar R_{e5} este rezistența echivalentă a ramurii în paralel la frecvența de 250 Hz (s-a ținut seamă de efectul de refulare a curentului în cal-

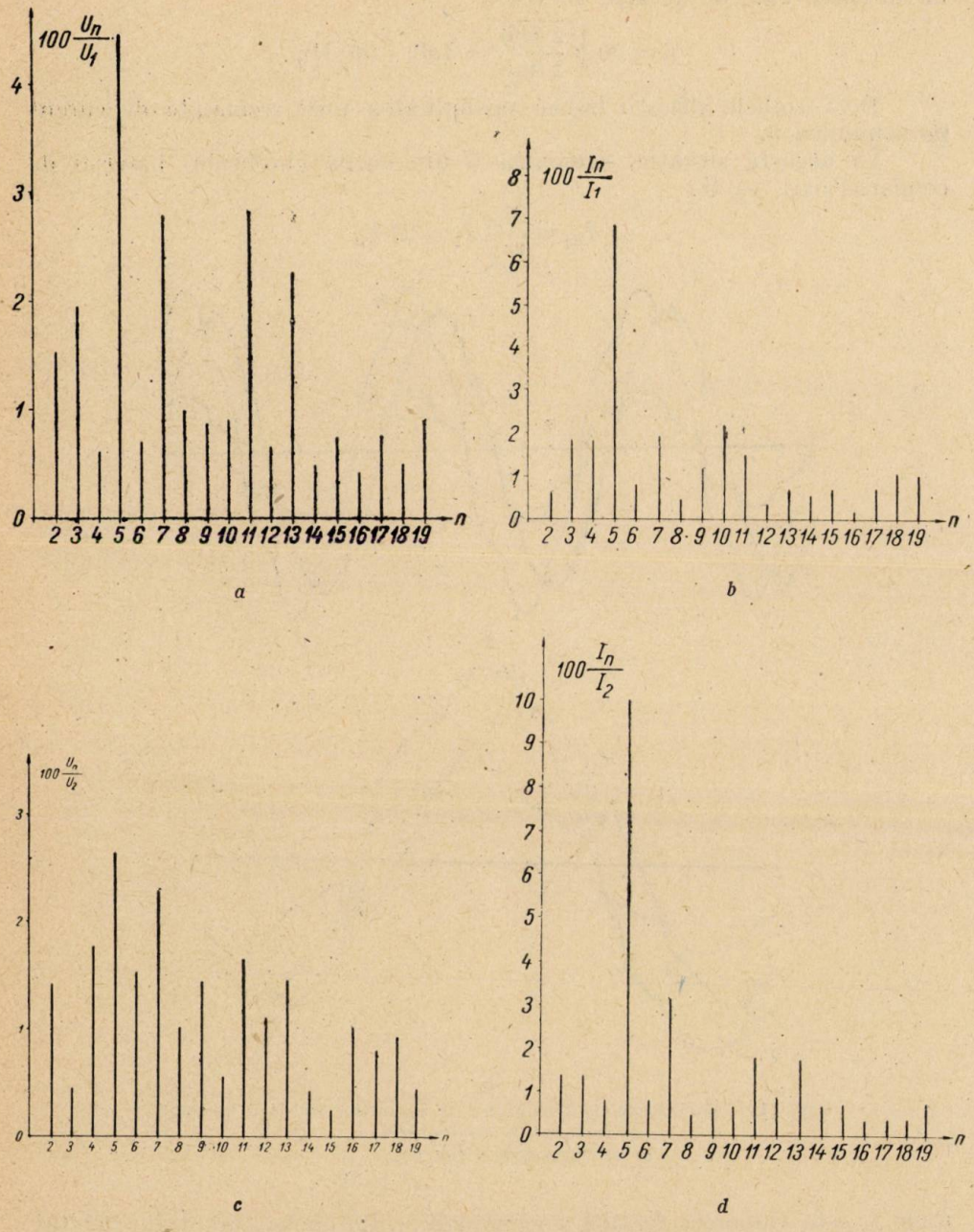


Fig. 12. — Analizele armonice ale curbelor din figura 11.
a, *b*) se lamineză sîrma $\varnothing = 5$.
c, *d*) „ „ „ $\varnothing = 10$.

cului rezistenței transformatorului și reactorilor). S-a stabilit astfel că numai valoarea efectivă a armonicii 5 din curba curentului care va străbate bateria de condensatoare va fi de 4 pînă la 16 ori curentul nominal al bateriei, iar pe barele stației va apărea armonica 5 de tensiune 70—300% din tensiunea nominală a barei. Evident aceste regimuri sînt complet inadmisibile și pentru evitarea apariției unor asemenea suprasolicitări vor trebui analizate următoarele măsuri posibile :

A. Montarea unor filtre serie pentru armonicile importante generate 5, 7, 11 din curba curentului redresorului utilizînd pentru aceasta o parte din bateria de condensatoare, restul bateriei rămînînd la dispoziția exploatării pentru reglajul puterii reactive și al tensiunii.

B. Realizarea împreună cu întreaga baterie de condensatoare a 3 filtre serie pentru armonicile 5, 7 și 11.

C. Realizarea în prima etapă cu întreaga baterie de 2,88 MVAR a unui singur filtru de armonica 5 și în etapa următoare cînd se va monta și a doua parte a bateriei de condensatoare a unui filtru pentru armonica 7 cu 1,44 MVAR.

Pentru aceasta este necesară efectuarea unui studiu tehnico-economic amănunțit.

AUSGLEICH DER VERZERRUNGSERSCHEINUNGEN IN GLEICHRICHTERANLAGEN MIT KONDENSATORBATTERIEN

I. DIE FOLGE DER OBERWELLEN UND DIE MITTEL FÜR DEREN BESEITIGUNG

ZUSAMMENFASSUNG

Beim Einsatz gleichstromgespeister Anlagen hoher Leistung über Gleichrichter treten Fragen hinsichtlich der Strom- und Spannungsverzerrung im elektromagnetischen System auf. Diese Verzerrungen haben unerwünschte Sekundärerscheinungen zur Folge (zusätzliche Verluste, Überspannungen, Störungen im Fernverkehrsnetz, usw.).

Gewöhnlich besitzen Anlagen dieser Art auch einen geringen Leistungsfaktor, weswegen ein Ausgleich der Blindleistung durch Kondensatorbatterien oder andere Mittel notwendig wird.

Bei Verwendung von Kondensatorbatterien können für eine oder mehrere Harmonische, Filter vorgesehen werden, denen im Grunde genommen die Rolle zukommt, einzelne Harmonische aus der Stromkurve der Gleichrichteranlage kurzzuschließen. In der Abhandlung werden die Bedingungen untersucht, zu denen diese Filter hinsichtlich einer Verbesserung der Verzerrungserscheinungen von Vorteil sind und die Kompensationsanlage der Blindleistung schützen. Hiebei werden die mathematischen Beziehungen gezeigt, mit deren Hilfe sich die Parameter dieser Filter berechnen lassen, und einige Anwendungsbeispiele aus der Praxis der chemischen und metallurgischen Industrie angeführt.

BIBLIOGRAFIE

1. C. I. BUDEANU, *Puissances réactives et fictives*. I. R. E. Inst. Rom. de energie, Bucureşti, 1927.
2. I. S. ANTONIU, *Funcţionarea wattmetrelor electrodinamice în regim deformant*. St. cerc. energ., **V**, *3—4*, 547—563 (1955).
3. C. BUDEANU, I. S. ANTONIU, M. POMÎRLEANU, *Funcţionarea motorului asincron în regim deformant de tensiune*. Comunic. Acad. R.P.R., *10*, 1026 (1958).
4. E. BORNITZ, M. HOFFMANN, G. LEINER, *Harmoniques dans les réseaux électriques et leur réduction au moyen de filtres*. CIGRE, rap. *304* (1958).
5. Д. В. ТИМОФЕЕВ, Р. П. БИРЮКОВ, *Условия работы конденсаторов в поперечно емкостных компенсационных установках*. Промышленная энергетика. *12* (1961).
6. A. SCHMIDT Jr., *Capacitors in power systems with rectifier loads*. Tr. A.I.E.E., **72**, 14—17 (1953).
7. D. RUMPEL, *Die wechselstromseitigen Spannungsharmonischen eines Stromrichters bei ideal idealer Sperresonanz des Netzes*. Arch. f. Elektrotechnik, **XLVI**, *1*, 47—58 (1961).
8. M. HOFFMANN, *Die Belastung des Kondensators durch Oberschwingungen*. Elektrizitätswirtschaft, 56 (1957).
9. — *Электротехнический справочник*. Том I, стр. *390*. Госэнергоиздат, Москва. 1956.
10. — *Electrical transmission and distribution*. Reference Book. Westinghouse Electric Corporation. Edition 4.00, 233—264 (1950).

COMPENSAREA REGIMULUI DEFORMANT LA INSTALAȚII DE REDRESARE ECHIPATE CU BATERII DE CONDENSATOARE

II. PRINCIPII DE ALEGERE A PARAMETRILOR INSTALAȚIILOR DE FILTRARE A ARMONICILOR

DE

E. ARIE, P. NICOLAE și H. CRISTEA

621.316.264.018.3 : 621.319.4.016.44

1. IPOTEZE DE CALCUL

În prima parte a acestui studiu a rezultat, ca soluție tehnică pentru compensarea puterii reactive și a efectelor deformante la instalațiile de redresoare la care predomină anumite armonici, instalarea de filtre pentru armonicile respective. În vederea alegerii parametrilor acestor instalații este necesară efectuarea de calcule tehnico-economice în așa fel încît soluția să respecte condițiile tehnice de funcționare a rețelei și a bateriei de condensatoare și să reprezinte un optim economic.

Conform ipotezelor indicate în prima parte a studiului s-a presupus că valorile armonicilor de curent, absorbite de instalația de redresoare sînt independente de schema și regimul rețelei. De asemenea, s-a presupus că valoarea componentei fundamentale a tensiunii între faze la barele stației, în regim normal de exploatare este U_{nominal}.

La dimensionarea instalației de compensare, s-au impus următoarele condiții tehnice. :

1. Supraîncărcarea admisibilă a condensatoarelor :

$$U_{\max} = \alpha_U \; U_{\text{nominal}}, \; I_{\max} = \alpha_i \; I_{\text{nominal}}.$$

2. Factor de distorsiune admisibil la barele consumatorului,

$$k_D = \frac{\sqrt{\sum_{k\neq 1} U_k^2}}{U}.$$

Întrucît nu există indici pentru aprecierea daunelor provocate în reţea de regimul deformant, s-a considerat că acestea sînt neglijabile în cazul în care se respectă condiţiile tehnice amintite.

Rezultă că soluţia optimă va fi aceea care va permite respectarea condiţiilor tehnice de mai sus, şi totodată va conduce la eficienţa economică maximă a instalaţiei de compensare a puterii reactive şi de filtrare a armonicilor.

2. PRINCIPIILE CALCULULUI TEHNICO-ECONOMIC

Soluţiile examinate pentru reducerea efectelor regimului deformant au fost următoarele :

a) Se realizează filtre, acordate pe frecvenţele $(n_1, n_2, \ldots, n_n) \times$ $\times$ 50 Hz, iar bateria de condensatoare se dimensionează pentru a genera puterea capacitivă suplimentară, faţă de cea generată de filtre, pînă la valoarea indicată de calculul privind compensarea puterii reactive.

b) Întreaga baterie de condensatoare este folosită pentru a forma filtre.

În toate soluţiile examinate intervin filtre, formate din bobine de reactanţă şi condensatoare. Se observă că soluţiile *b* nu sînt decît cazuri particulare ale soluţiei *a* şi anume cazul în care puterea bateriei de condensatoare suplimentare se anulează.

S-au admis ca variabile, puterile reactive debitate pe fundamentală, de bateriile de condensatoare ale fiecărui filtru.

În alternativa *a*, fiecare soluţie va fi caracterizată prin următorii parametri :

$$Q_1^{(n_1)}, Q_1^{(n_2)}, \ldots, Q_1^{(n_n)}, Q_1^{(\infty)},$$

unde indicele superior indică numărul de ordine al armonicii pentru care este acordat filtrul ; $Q_1^{(\infty)}$ este puterea reactivă debitată de bateria de condensatoare fără bobină de self în serie.

Puterea reactivă totală Q_{1t} debitată pe fundamentală este :

$$Q_1^{(n_1)} + Q_1^{(n_2)} + \ldots + Q_1^{(n_n)} + Q_1^{(\infty)} = Q_{1t}. \qquad (1)$$

Numărul celulelor necesare în ipoteza că numărul filtrelor este stabilit fiind invariabil, soluţia optimă va fi aceea pentru care costul total al bobinelor de reactanţă $(K_L^{(n_1)}, K_L^{(n_2)}, K_L^{(n_n)})$ şi al condensatoarelor $(K_c^{(n_1)}, K_c^{(n_2)}, K_c^{(n_n)}, K_c^{(\infty)})$ va fi minim

$$K_{\text{total}} = K_L^{(n_1)} + K_L^{(n_2)} + \ldots + K_L^{(n_n)} + K_c^{(n_1)} + K_c^{(n_2)} + \ldots + K_c^{(n_n)} + K_c^{(\infty)} = \text{minim}.$$

Dacă puterea reactivă Q_1 dată de relația (1) este impusă, minimul costului total K_t se obține, folosind multiplicatorii Lagrange, din relația (2):

$$\frac{\partial(K_L^{(n_1)}+K_c^{(n_1)})}{\partial Q_1^{(n_1)}}=\frac{\partial(K_L^{(n_1)}+K_c^{(n_1)})}{\partial Q_1^{(n_2)}}=\ldots=\frac{\partial(K_L^{(n_n)}+K_c^{(n_n)})}{\partial Q_1^{(n_n)}}=\frac{\partial K_c^{\infty}}{\partial Q_1^{(\infty)}}. \tag{2}$$

Examinarea expresiei obținute pentru funcția K în paragraful următor, arată că soluția relației (2) reprezintă efectiv un minim (nu un maxim) al costului.

3. EXPRESIA COSTULUI CONDENSATOARELOR FOLOSITE ÎN SCHEMA UNOR FILTRE DE ARMONICI

Condensatoarele folosite în schema filtrelor sînt parcurse de un curent deformat, ceea ce corespunde la o solicitare suplimentară față de cea datorită componentelor fundamentale ale tensiunii și curentului. Pe de altă parte, din totalul puterii reactive debitate de condensator pe frecvența de 50 Hz, numai o parte ajunge în rețea, restul fiind absorbit de bobina de reactanță.

Fie

$C^{(n)}$ — capacitatea bateriei de condensatoare folosită pentru formarea unui filtru acordat pe armonica n;

$I_1^{(n)}$ — componenta fundamentală a curentului debitat de filtrul n (ce parcurge bateria de condensatoare și bobina de reactanță, legate în serie);

$I_k^{(n)}$ — armonica de ordinul k a curentului debitat de filtrul n;

$U_{c1}^{(n)}$ — componenta fundamentală a tensiunii la barele bateriei de condensatoare din filtrul n;

$U_{ck}^{(n)}$ — armonica de ordinul k a tensiunii la barele bateriei de condensatoare din filtrul n;

$U_1^{(n)}$ — tensiunea la barele la care este conectat filtrul (s-a admis $U_1 = U_{\text{nominal}}$;

$U_c^{(n)}$ — valoarea eficace a tensiunii la barele bateriei de condensatoare din filtrul n;

$I_f^{(n)}$ — valoarea eficace a curentului ce parcurge filtrul n.

Tensiunile sînt date între faze, în kV, iar curenții în amperi.

Ținînd seama că:

$$I_1^{(n)}=\frac{U_1\cdot 10^3}{\sqrt{3}\left(L^{(n)}\omega-\frac{1}{C^{(n)}\omega}\right)} \text{ și } U_{c1}^{(n)}=\frac{\sqrt{3}\ I_1^{(n)}\cdot 10^{-3}}{C^{(n)}\ \omega}$$

și că

$$n L^{(n)}=\frac{1}{n\ C^{(n)}\omega}, \tag{3}$$

rezultă :

$$U_{c1}^{(n)} = a_n U_1 ; \; U_c^{(n)} = \sqrt{a_n^2 U_1^2 + 3 \sum_{k \neq 1} \left(\frac{I_k^{(n)}}{n C \omega} \right)^2 10^{-6}}, \tag{4}$$

unde

$$a_n = \frac{n^2}{n^2 - 1}.$$

Puterea reactivă debitată de filtru pe frecvenţa de 50 Hz, este

$$Q_1^{(n)} = \sqrt{3}\, U_1 I_1^{(n)} = a_n U_1^2 C^{(n)} \omega \cdot 10^3, \tag{5}$$

astfel că

$$I_f^{(n)} = \sqrt{\left(\frac{Q_1^{(n)}}{\sqrt{3} U_1} \right)^2 + \sum_{k \neq 1} I_k^{(n)2}}. \tag{6}$$

Solicitarea bateriei de condensatoare este cu atît mai mare, cu cît valorile eficace ale tensiunii la borne şi ale curentului debitat, sînt mai mari; dincolo de limitele de suprasarcină admise ($\alpha_u U_{\text{nominal}}$, $\alpha_i I_{\text{nominal}}$), este necesară supradimensionarea bateriei. Am considerat de aceea costul bateriei de condensatoare, proporţional cu puterea ei aparentă maximă, extrapolînd legea de porporţionalitate şi în domeniul în care supradimensionarea bateriei nu este necesară, datorită rezervei de supraîncărcare. Aceasta reprezintă o aproximaţie, justificată prin aceea că şi supraîncărcarea condensatorului reprezintă anumite daune : reducerea duratei de viaţă, reducerea rezervei disponibile pentru supratensiuni pe bară.

Spre deosebire de alţi autori [8], am considerat că preţul bateriei de condensatoare variază în funcţie de puterea aparentă şi nu în funcţie de puterea reactivă totală generală, întrucît atît tensiunea eficace, cît şi curentul eficace sînt elemente de care trebuie ţinut seama la proiectare.

Luînd preţul condensatoarelor p_c rezultă costul bateriei de condensatoare din filtrul de armonică n

$$K_c^{(n)} = p_c a_n U_1 \sqrt{\left[1 + 3 \left(\frac{I_{\text{nom}} U_1}{n Q_1^{(n)}} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{Q_1^{(n)}}{\sqrt{3} U_1} \right)^2 + I_1^{(n)2} \right]}. \tag{7}$$

4. EXPRESIA COSTULUI BOBINELOR DE INDUCTANŢĂ

Analizînd variaţia preţului reactoarelor în funcţie de parametrii caracteristici, se observă că preţul K variază liniar cu reactanţa X, iar panta $\frac{\Delta K_L}{\Delta X}$ a curbelor $K_L(X)$, variază proporţional cu curentul nominal ce traversează reactorul [9].

S-a stabilit astfel următoarea relaţie pentru costul reactoarelor

$$K_L = K_0 + p_L X I_L,$$

I_L este curentul nominal ce traversează bobina de reactanță, în amperi. Expresia acestui curent în regim deformant, este

$$I_L = \sqrt{I_1^2 + \sum I_k^{(n)2}} = \sqrt{\left(\frac{Q_1^{(n)}}{\sqrt{3}\,U_1}\right)^2 + \sum (I_k^{(n)})^2}, \tag{8}$$

X este reactanța pe fază a bobinei, în Ω.

Pentru filtrul acordat pe armonica n, această reactanță are valoarea

$$X = \frac{a_n\, U_1^2}{n^2 Q_1^{(n)}} 10^3, \tag{9}$$

astfel că rezultă expresia costului bobinei de reactanță folosită în filtrul acordat pe frecvența $n \times 50$ Hz ;

$$K_L^{(n)} = K_0 + p_L \frac{a_n\, U_1}{3\, n^2} \sqrt{1 + 3\,\frac{U_1^2}{Q_1^{(n)2}} \sum_{k \neq 1} I_k^{(n)2}}. \tag{10}$$

5. ALEGEREA PARAMETRILOR OPTIMI PENTRU ELEMENTELE FILTRELOR

Folosind relațiile deduse pentru costul bobinelor de inductanță și a bateriilor de condensatoare care intră în componența filtrelor de armonici, termenii relației 2 au fost scriși în funcție de variabilele alese : $Q_1^{(n_1)} \ldots Q_1^{(n_n)} Q_1^{(\infty)}$.

Pentru simplificarea relațiilor s-a considerat că fiecare din filtrele de armonici este parcurs de un curent compus numai din fundamentală și o singură armonică, de frecvența pentru care este acordat filtrul.

Pentru a ține totuși seama și de faptul că în realitate, circuitul de filtrare a armonicilor este parcurs de un curent ce conține și armonici al căror ordin diferă de n se admite în calcul pentru componenta $I_n^{(n)}$, o valoare mai mare decît aceea a armonicii de ordinul n a curentului absorbit de consumator. Cu această simplificare, și introducînd notația

$$\frac{\sqrt{3}\, U_1 I_n^{(n)}}{Q_1^{(n)}} = x_n, \tag{11}$$

se obține pentru derivata costului bateriilor de condensatoare din circuitele filtrante

$$\frac{\partial K_C^{(n)}}{\partial Q_1^{(n)}} = p_c\; a_n \frac{1 - \dfrac{x_n^4}{n^2}}{\sqrt{1 + \left(1 + \dfrac{1}{n^2}\right) x_n^2 + \dfrac{x_n^2}{n^2}}}, \tag{12}$$

iar pentru derivata costului bobinelor de inductanță :

$$\frac{\partial K_L^{(n)}}{\partial Q_1^{(n)}} = - p_L\, a_n \frac{U_1^2}{Q_1^{(n)}} \frac{x_n^2}{n^2 \sqrt{1 + x_n^2}}. \tag{13}$$

Armonicile curentului ce parcurge bateria de condensatoare destinată exclusiv compensării puterii reactive, au fost considerate neglijabile, astfel încît puterea aparentă a acestei baterii de condensatoare este egală cu puterea reactivă debitată pe frecvenţa undei fundamentale, iar costul ei

$$K = p_c Q_c^{(\infty)}.$$

Derivata costului este deci:

$$\frac{\partial K_c^{(\infty)}}{\partial Q_c^{(\infty)}} = p_c .$$

Se observă că

$$\frac{\partial (K_c^{(n)} + K_L^{(n)})}{\partial Q_1^{(n)}} < p_c,$$

astfel încît relaţia (2)

$$\frac{\partial (K_c^{(n)} + K_L^{(n)})}{\partial Q_1^{(n)}} = \frac{\partial K_c^{(\infty)}}{\partial Q_1^{(\infty)}},$$

nu poate fi îndeplinită.

Rezultă că din punct de vedere economic nu se justifică varianta *a* în care se prevăd atît circuite de filtrare a armonicilor, cît şi baterii de condensatoare separate pentru puterea reactivă.

Varianta *a* se reduce astfel la varianta *b* în care întreaga putere reactivă necesară la 50 Hz este produsă de circuite de filtrare acordate pe frecvenţele de $(n_1, n_2, \ldots, n_n) \times 50$ Hz. Pentru a determina parametrii optimi ai circuitelor de filtrare, se calculează derivatele $\frac{\partial K_{L+c}^{(n)}}{\partial Q_1^{(n)}}$ pentru diferite valori ale parametrului x_n. Pentru a determina valorile armonicilor de curent $I_n^{(n)}$, se fac mai multe tatonări, în felul următor: se aleg într-o primă aproximaţie valori arbitrare, apoi se determină valorile parametrilor filtrelor şi armonicile de curent datorite redresorului care traversează filtrele $I_k^{(n)}$.

Cu valorile calculate pentru

$$\frac{\partial K_c^{(n)}}{\partial Q_1^{(n)}}, \frac{\partial K_L^{(n)}}{\partial Q_1^{(n)}}, \quad Q_1^{(n)}$$

se construieşte diagrama variaţiei puterii reactive totale debitate pe frecvenţa f_0, în ipoteza satisfacerii condiţiei de minimalizare a costului total al filtrelor

$$\frac{\partial K_{c+L}^{(n_1)}}{\partial Q_1^{(n_1)}} = \frac{\partial K_{c+L}^{(n_2)}}{\partial Q_1^{(n_2)}} = \ldots = \frac{\partial K_{c+L}^{(n_n)}}{\partial Q_1^{(n_n)}} . \tag{14}$$

Această diagramă se obţine prin însumarea curbelor de variaţie a puterilor reactive $Q_1^{(n)}$ în funcţie de valorile derivatei costului (fig. 1).

Segmentele interceptate de aceste curbe pe o ordonată oarecare determină parametrii diferitelor filtre care se pot deduce din puterea reactivă $Q_1^{(n)}$ debitată la frecvența f_0, folosind relațiile (4), (5), (6) și (9).

Dacă puterea reactivă totală necesară pe barele consumatorului este cunoscută, problema dimensionării filtrelor este astfel rezolvată.

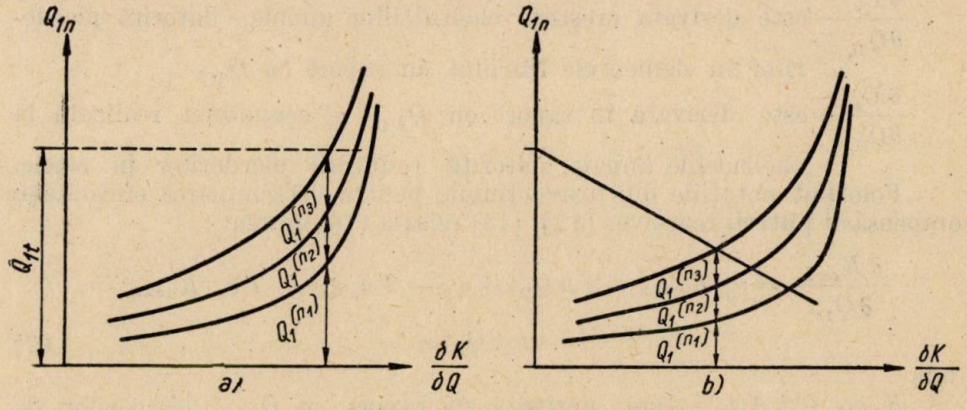


Fig. 1. — Dimensionarea economică a filtrelor.
a) Puterea reactivă totală impusă.
b) Dimensionarea economică a întregii instalații de compensare a puterii reactive și deformante.

Dacă problema se extinde și la dimensionarea economică a bateriei de condensatoare, ținînd seama de eficacitatea economică a compensării puterii reactive, se poate folosi aceeași diagramă, în felul următor :

În conformitate cu instrucțiunile privind determinarea eficacității economice a investițiilor capitale și a tehnicii noi [11], soluția optimă este aceea pentru care este îndeplinită egalitatea

$$T = -\frac{\Delta I}{\Delta C}, \tag{15}$$

unde

T — termenul de recuperare a investițiilor suplimentare,
ΔI — diferența investițiilor totale în două variante,
ΔC — diferența cheltuielilor anuale, în două variante.

Alegînd ca parametru caracteristic al variantelor puterea reactivă totală debitată la frecvența f_0, egalitatea (15) poate fi scrisă sub forma

$$\frac{\partial K_{c+L}}{\partial Q_{1t}} = \frac{\partial I_G}{\partial Q_{1t}} - T\frac{\partial C_c}{\partial Q_{1t}} + \frac{\partial C_p}{\partial Q_{1t}}, \tag{16}$$

unde

$\frac{\partial K_{L+c}}{\partial Q_{1t}}$ — este derivata costului filtrelor în raport cu puterea reactivă totală, pe fundamentală Q_{1t},

$\frac{\partial I_G}{\partial Q_{1t}}$ — este derivata reducerii costului instalaţiilor din centralele electrice, datorită reducerii vîrfului de putere activă (prin reducerea pierderilor în reţele) şi datorită reducerii puterii reactive produse în centrale, în raport cu Q_{1t},

$\frac{\partial C_c}{\partial Q_{1t}}$ — este derivata creşterii cheltuielilor anuale, datorită pierderilor în elementele filtrului, în raport cu Q_{1t},

$\frac{\partial C_p}{\partial Q_{t1}}$ — este derivata în raport cu Q_{1t}, a economiei realizată la cheltuielile anuale, datorită reducerii pierderilor în reţele.

Folosind notaţiile din instrucţiunile pentru determinarea eficacităţii compensării puterii reactive, [12], [13] relaţia (16) devine

$$\frac{\partial K_{c+L}}{\partial Q_{1t}} = \gamma_1(K_{e\,\max} - 2AQ_{1t}) + \gamma_2 - Tc_e\pi_c\tau + Tc_e(K_{e\,\text{med}} - 2AQ_{1t})\tau, \tag{17}$$

unde

$K_{e\,\max} - 2AQ_{1t}$ — este derivata în raport cu Q_{1t} a pierderilor de putere activă în sistem, la ora de vîrf (kW/kVAR),

$K_{e\,\text{med}} - 2AQ_{1t}$ - este derivata în raport cu Q_{1t} a pierderilor medii de putere în sistem (kW/kVAR),

γ_1 — investiţia suplimentară raportată la 1 kW, pentru creşterea puterii active instalate în sistem (lei/kW),

γ_2 — investiţia suplimentară, raportată la 1 kVAR, necesară pentru creşterea puterii reactive maxime debitate de centralele electrice ale sistemului (lei/kVAR),

c_e — preţul de cost al energiei predate la bornele consumatorului (lei/kW ore),

π_c — coeficientul de pierderi active în filtru (kW/kVAR),

τ — durata de funcţionare a instalaţiei de compensare (ore).

Membrul drept al egalităţii (17) poate fi reprezentat grafic printr-o dreaptă (fig. 1 *b*). La intersecţia acestei drepte, cu curba variaţiei puterii reactive totale debitate de filtru, în funcţie de derivata costului, se obţine soluţia economică pentru compensarea puterii reactive şi filtrarea armonicilor.

6. LIMITE IMPUSE DIMENSIONĂRII FILTRELOR DE ARMONICI. DE FACTORUL DE DISTORSIUNE ADMISIBIL PENTRU TENSIUNEA REŢELEI

Prin montarea unor filtre de armonici la consumatorii deformanţi se îmbunătăţesc condiţiile de funcţionare a reţelei, prin eliminarea din curentul reţelei a armonicilor la care sînt acordate filtrele şi prin reducerea

celorlalte armonici. Armonica de ordin k a curentului din rețea, I_k^0, este

$$I_k^0 = \frac{1}{1 + X_k^0 \sum \frac{1}{X_k^{(n)}}} I_k, \tag{18}$$

unde

X_k^0 — este reactanța echivalentă a rețelei, la frecvența k, între bara de tensiune constantă, sinusoidală și bara la care sînt conectate filtrele și consumatorii deformanți,

$X_k^{(n)}$ — este reactanța la frecvența k a filtrului acordat la frecvența n,

I_k — armonica de ordin k a curentului cerut de consumatorul deformant.

Factorul de distorsiune al tensiunii la barele consumatorului este :

$$k_{D\,\%} = \frac{\sqrt{3}}{10} \frac{1}{U} \sqrt{\sum_{\substack{k \neq 1 \\ k \neq n}} (X_k^0 \, I_k^0)^2}, \tag{19}$$

unde U este valoarea eficace a tensiunii în nodul consumator, în kV.

În relația (19) suma se extinde la armonicile din curentul consumatorului pentru care nu s-au prevăzut filtre. Dacă se notează cu N_S, puterea de scurtcircuit, în nodul consumator (resp. I_S curentul de scurtcircuit)

$$N_S = 10^3 \frac{U^2}{X_1^0} \; ; \; I_S = \frac{U \cdot 10^3}{\sqrt{3} X_1^0}, \tag{20}$$

și se ține seama că

$$X_k^0 = k \, X_1^0, \tag{21}$$

iar

$$X_k^{(n)} = \left(\frac{k}{n^2} - \frac{1}{k} \right) \frac{n^2}{n^2 - 1} \frac{U^2}{Q_1^{(n)}} 10^3, \tag{22}$$

unde $Q_1^{(n)}$ este puterea reactivă debitată pe bara consumatorului de filtrul de ordinul n, în kVAR, la frecvența f_0, expresia factorului de distorsiune devine :

$$k_{D\,\%} = \frac{100}{I_S} \sqrt{\sum_k \left[\frac{k \, I_k}{1 + \sum \frac{n^2 - 1}{1 - \frac{n^2}{k^2}} \frac{Q_1^{(n)}}{N_S}} \right]^2}. \tag{23}$$

În cazul particular al instalațiilor de redresoare polifazate se poate admite în mod acoperitor că nu apar decît armonicile 5, 7, 11 și 13, iar valoarea eficace a armonicii de curent I_k este

$$I_k \approx \frac{I_{max}}{k} = \frac{N_{max}}{k \sqrt{3} \, U},$$

unde

N_{max} este puterea aparentă maximă absorbită de instalaţia de redresoare la frecvenţa f_0.

Factorul de distorsiune pentru instalaţii de redresoare va avea deci expresia

$$k_{D\,\%} = 100 \frac{N_{max}}{N_S} \sqrt{\sum_k \left[\frac{1}{1 + \sum_n \frac{n^2 - 1}{1 - \frac{n^2}{k^2}} \frac{Q_1^{(n)}}{N_S}} \right]^2} . \qquad (24)$$

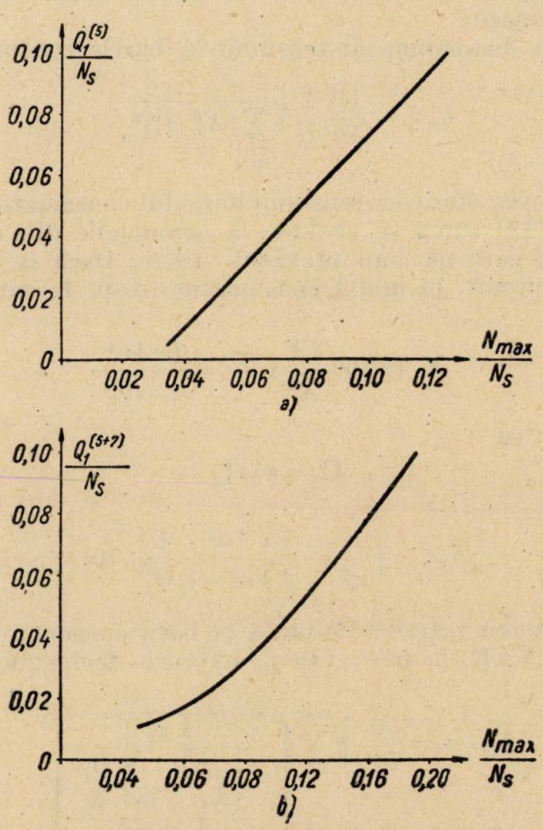


Fig. 2. — Puterea reactivă minimă necesară a filtrelor, pentru un factor de distorsiune a tensiuniide 5 %.
a) Un singur filtru acordat pe frecvenţa armonică 5.
b) Două filtre, acordate pe frecvenţa armonicilor 5 şi 7.

În funcţie de puterea maximă aparentă a instalaţiei de redresoare, de puterea de scurtcircuit la barele consumatorului şi de factorul de distorsiune admisibil, se poate dimensiona instalaţia de filtrare a armonicilor

alegînd valorile parametrilor $Q_1^{(n)}$ astfel încît să satisfacă relația (23) sau în cazul instalațiilor de redresoare, relația (24).

Se observă că valorile determinate cu aceste relații reprezintă limite inferioare pentru puterea reactivă a filtrelor, deoarece k_D scade cînd Q_{1t} crește.

Cu relația (24) s-au determinat pentru instalații de redresoare puterile reactive minime, în cazul utilizării unui singur filtru acordat pentru 5×50 Hz (fig. 2 *a*) și în cazul utilizării a două filtre — unul acordat la 5×50 Hz și altul la 7×50 Hz (fig. 2 *b*) în ipoteza unui factor de distorsiune admisibil de 5%.

La trasarea curbelor (fig. 2) s-a admis că puterea reactivă debitată la frecvența f_0 se repartizează între cele două filtre proporțional cu pătratul ordinului armonicei corespunzătoare, adică

$$\frac{Q_1^{(5)}}{Q_1^{(7)}} = \frac{49}{25},$$

sau, notînd $Q_1^{(7)} + Q_1^{(5)} = Q_{1t}$,

$$Q_1^{(5)} = 0{,}662\ Q_{1t};\ Q_1^{(7)} = 0{,}338\ Q_{1t}.$$

Dacă din calculul economic, rezultă o putere reactivă Q_{1t} mai mare decît cea care corespunde pe curba din figura 2, puterii maxime aparente a consumatorului studiat și puterii de scurtcircuit la barele consumatorului, soluția obținută din calculul tehnico-economic îndeplinește și condiția privind factorul de distorsiune.

În caz contrar este necesară verificarea factorului de distorsiune printr-un calcul exact. Pentru reducerea factorului de distorsiune se poate recurge fie la mărirea numărului circuitelor de filtrare (adăugîndu-se instalații de filtrare pentru armonicile 11 și eventual 13), fie la mărirea puterii capacitive instalate în filtrele de ordinul 5 și 7. Prima soluție conduce la o reducere mai substanțială a factorului de distorsiune.

7. DETERMINAREA PARAMETRILOR NOMINALI AI ELEMENTELOR FILTRELOR

Cu ajutorul parametrului caracteristic al fiecărui filtru Q_1 (puterea reactivă debitată la frecvența f_0 pe barele consumatorului) se pot determina parametrii nominali ai elementelor filtrelor.

Componenta fundamentală a curentului din filtrul de ordin n, este

$$I_1^{(n)} = \frac{Q_1^{(n)}}{\sqrt{3}\,U_1},$$

iar valoarea armonicii k

$$I_k^{(n)} = \frac{\dfrac{n^2-1}{1-\dfrac{n^2}{k^2}} \dfrac{Q_1^{(n)}}{N_s} I_k}{1+\sum \dfrac{n^2-1}{1-\dfrac{n^2}{k^2}} \dfrac{Q_1^{(n)}}{N_s}}. \tag{25}$$

Componenta fundamentală a tensiunii la bornele bateriei de condensatoare este

$$U_{c1}^{(n)} = \frac{n^2}{n^2-1} U_1,$$

iar a căderii de tensiune în bobina de reactanţă

$$\Delta U_{x1}^{(n)} = \frac{U_1}{n^2-1}.$$

Din aceste valori, rezultă reactanţele, valorile eficace ale tensiunilor şi curenţilor maximi din elementele circuitelor de filtrare.

La alegerea valorilor nominale, se va ţine seama de gradul de supraîncărcare admis de întreprinderile constructoare ($\alpha_u U_{\text{nom}}$, $\alpha_I I_{\text{nom}}$). Este însă indicat în general, să se prevadă o oarecare rezervă de supraîncărcare, deoarece datorită altor receptoare deformante din reţea, precum şi datorită unor supratensiuni, pot apare supraîncărcări suplimentare. Calculele efectuate arată, că dacă se alege ca tensiune nominală a bateriei de condensatoare, tensiunea nominală a barei consumatorului, supraîncărcarea bateriei se reduce la creşterea puterii reactive debitate de circuitul de filtrare, la frecvenţa f_0. Dacă puterea reactivă totală necesară Q_{1t} este cunoscută, supraîncărcarea bateriilor de condensatoare se reduce dacă se reduce numărul circuitelor de filtrare ceea ce conduce totodată la o reducere a costului. Reducerea numărului circuitelor de filtrare este însă limitată, deoarece conduce la o mărire a factorului deformant (v. par. 6).

Este de observat că filtrele au o reactanţă totală capacitivă, faţă de armonicile de ordin inferior celui pentru care sînt acordate. De aceea este necesar să se prevadă la instalaţii de redresoare în primul rînd filtre pentru armonica 5, iar apoi pentru armonica 7, 11, 13 — în ordinea menţionată. Aceeaşi succesiune trebuie respectată şi la conectarea acestora, iar la deconectare, ordinea inversă, în caz contrar pot apare efecte de amplificare a armonicilor în filtre şi în reţea.

La întreprinderile mari la care instalaţiile de redresare sînt repartizate la numeroase secţii separate prin distanţe relativ mari, poate să fie avantajoasă compensarea descentralizată a puterii reactive şi deci şi descentralizarea filtrelor de armonici. Pentru a evita supraîncărcarea bateriilor de condensatoare, este necesar ca în asemenea cazuri să se prevadă o rezervă suficientă la filtrele unităţilor mai puternice şi să se ia măsuri pentru ca filtrele unităţilor mici să se deconecteze dacă unităţile mari funcţionează fără filtre de acelaşi ordin.

8. APLICAȚIE

Alegerea circuitelor de filtrare pentru instalația de redresoare a cărei schemă este redată în partea I a acestui studiu (fig. 10) s-a făcut pe baza valorilor armonicilor de curent din tabela 1 coloana a 2-a.

Tabela 1

k	Valori eficace a armonicii k a curentului			
	În redresor	În filtru 5	În rețea	În filtru 7
1		262		128,3
2	11,4	2,54	14,7	0,88
3	11	12	27,3	4,3
4	5,7	11,8	9,3	3,26
5	68,3	68,3	0	0
6	4,53	7,5	3,54	6,5
7	22,7	0	0	22,7
8	3,03	0,83	0,63	1,61
9	4,55	1,33	1,19	2,03
10	4,44	1,37	1,31	1,77
11	12,5	3,46	3,94	4,56
12	6,8	2,07	2,40	2,43
13	10,6	3,34	3,66	3,54
14	4,55	1,34	1,61	1,58
15	4,94	1,55	1,80	1,57
16	2,27	0,69	0,83	0,75
17	2,27	0,71	0,79	0,76
18	2,51	0,78	0,88	0,86
19	5,68	1,78	1,96	1,96

Admițînd pentru etapa finală, două circuite de filtrare, unul pentru armonica 5 și unul pentru armonica 7, calculul economic a condus la construirea curbei din figura 3, care pentru $Q_{1t} = 4\,300$ kVAR, determină soluția

$$Q_1^{(5)} = 2\,800 \text{ kVAR},$$

$$Q_1^{(7)} = 1\,500 \text{ kVAR}.$$

S-a recomandat ca într-o primă etapă să se monteze numai circuitul de filtrare a armonicii 5, iar într-o etapă următoare și circuitul de filtrare a armonicii 7 ; tensiunea nominală admisă pentru bateria de condensatoare a fost 6,3 kV. Cu relațiile (25) și (19), s-au calculat curenții în circuitele de filtrare și factorul deformant la barele de 110 kV.

Factorul de distorsiune fiind redus, nu este necesară divizarea bateriei de condensatoare într-un număr mai mare de circuite de filtrare (adică și pentru armonicile 11 și eventual 13), ceea ce ar conduce în mod inutil la mărirea supraîncărcării bateriilor de condensatoare.

Puterea reactivă generată de instalația de compensare, poate fi reglată prin comutarea circuitului de filtrare a armonicii 7.

În alternativă s-a examinat şi o variantă în care puterea reactivă suplimentară necesară în a doua etapă, ar fi produsă de o baterie de condensatoare, fără bobine de inductanţă în serie. Această variantă nu a putut fi însă reţinută, deoarece împreună cu circuitul de filtrare pentru armonica 5 şi cu reactanţa echivalentă a reţelei, o astfel de baterie ar fi

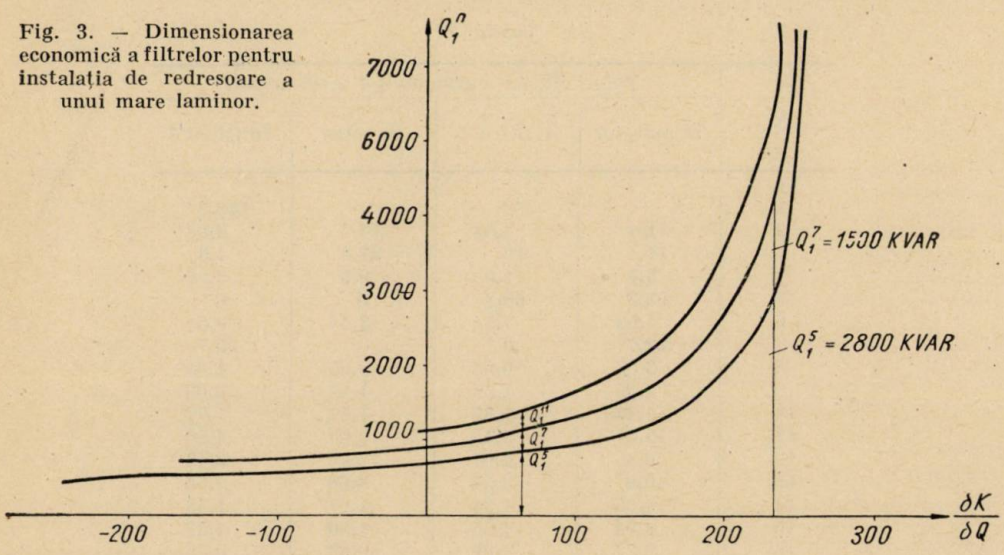


Fig. 3. — Dimensionarea economică a filtrelor pentru instalaţia de redresoare a unui mare laminor.

format un circuit rezonant, cu frecvenţa de rezonanţă apropiată de 11 f_0, ceea ce ar fi condus la armonici periculoase de curent şi de tensiune de ordinul 11.

9. CONSIDERAŢII ASUPRA SCHEMEI DE CONEXIUNI

Bateriile de condensatoare montate în instalaţii pentru compensarea factorului de putere pot fi conectate în stea cu neutrul izolat sau pus la pământ şi în triunghi.

Conexiunea în stea cu neutrul izolat este de preferat din punctul de vedere al protecţiei, deoarece la scurtcircuitarea unei grupe serie de condensatoare pe fază, curentul de defect nu atinge curentul maxim de scurtcircuit — ca în cazul conexiunii stea cu neutrul pus la pământ — fiind limitat de reactanţa condensatoarelor din celelalte faze sănătoase. Deoarece condensatoarele se protejează individual prin fuzibile înseamnă că puterea de rupere, respectiv dimensiunile fuzibilelor vor fi corespunzător mai reduse.

Şi din punctul de vedere al utilizării filtrelor de armonice cu condensatoare şi bobine de reactanţă se recomandă conexiunea stea cu neutrul izolat, bobinele de reactanţă se montează din partea punctului de conexi-

une în stea, fiind astfel protejate împotriva scurtcircuitelor între faze prin reactanțele condensatoarelor (rămînînd să se ia măsuri de protecție contra defectelor de altă natură).

10. PROTECȚIA CONTRA SUPRATENSIUNILOR

În cazul folosirii unor întreruptoare moderne cu ulei și rezistențe auxiliare sau întreruptoare cu aer comprimat fără rezistențe auxiliare, conectarea și deconectarea circuitelor de filtrare nu conduce la supratensionare.

În ceea ce privesc supratensiunile atmosferice, dacă instalația de filtrare se conectează la bare protejate contra supratensiunilor atmosferice, atunci nu mai este necesară montarea unor paratonere la condensatoare, ci numai la bobinele de reactanță.

11. PROTECȚIA INDIVIDUALĂ A CONDENSATOARELOR

Pentru bateriile de condensatoare ale instalațiilor de compensare și filtrare a armonicilor, de la 15 kVAR în sus pe unitate, este indicat să se protejeze condensatoarele individual prin fuzibile. În felul acesta există avantajul față de alte scheme, că la defectarea unui condensator, prin arderea fuzibilului condensatorul individual este separat neafectînd întreaga fază. Dacă dezechilibrul creat între grupe și pe faze este admisibil, prin separarea condensatorului defect, nu este afectată funcționarea bateriei de condensatoare.

Prin deconectarea unui număr neadmisibil de elemente din grupul serie, există pericolul de supratensionare a condensatoarelor din aceeași fază. Pentru conexiunea dată în figura 4 se stabilește numărul minim de elemente din grupă prin scoaterea cărora tensiunea pe grup nu depășește supratensiunea de $\alpha_v U$.

Se notează :

m — numărul grupelor,

n — numărul condensatoarelor conectate paralel în grup,

p — numărul maxim admisibil de condensatoare ce se pot deconecta dintr-o grupă,

X_c — reactanța unui condensator.

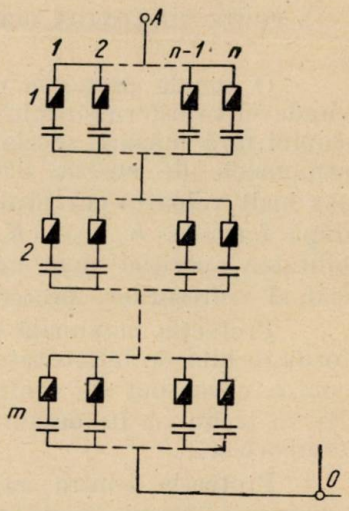


Fig. 4. — Schema de conexiune a bateriei de condensatoare pe o fază.

Deoarece tensiunile se repartizează direct proporţional cu reactanţele, rezultă

$\frac{1}{m}$ — coeficientul de repartiţie al tensiunii pe un singur grup la funcţionarea normală,

$$\frac{\frac{x}{n-p}}{\frac{x}{n}(m-1)+\frac{x}{n-p}} = \frac{n}{(m-1)(n-p)+n}$$

— coeficientul de repartiţie al tensiunii pe grupul din care s-au deconectat p condensatoare,

$$\frac{\left[\frac{n}{(m-1)(n-p)+n} - \frac{1}{m}\right]}{\frac{1}{m}} 100 \leqslant \alpha_v$$

— supratensiunea faţă de regimul normal.

Din relaţia de mai sus, m şi n fiind daţi, se poate determina p — numărul admisibil de condensatoare din grupă ce pot fi deconectate fără a exista pericolul de supratensionare peste valoarea admisă.

Pentru detectarea rapidă a siguranţei arse, panoul cu siguranţe trebuie să fie prevăzut cu semnalizare selectivă de ardere a siguranţelor.

12. PROTECŢIA CONTRA CURENŢILOR DE SCURTCIRCUIT ŞI SUPRASARCINILOR

O simplă protecţie maximală cu relee de curent conectate în secundarul transformatorului de curent nu poate asigura protecţia la suprasarcini fără măsuri speciale, deoarece releul este mult mai sensibil la armonicele de curent decît la componenta fundamentală a curentului aşa încît valoarea curentului de pornire a releului nu mai poate fi reglată după formula $K_S I_{nom}$ (K_S — coeficientul de siguranţă). Existînd posibilitatea apariţiei unor armonici neprevăzute datorită unui regim special al redresorilor, protecţia poate acţiona în mod greşit.

Protecţia maximală cu relee de curent legate la secundarul transformatorului de intensitate ce se va monta asigură protejarea instalaţiei contra curenţilor de scurtcircuit, funcţionînd ca secţionare de curent. Ea va trebui să fie desensibilizată pentru curenţii de comutaţie printr-o temporizare.

Protecţia contra supratensiunilor a condensatorilor în condiţiile existenţei armonicilor de curent se asigură cu o protecţie directă cu caracteristică independentă de frecvenţă. Această protecţie se construieşte dintr-o lamelă bimetalică ce se montează ca şunt în circuitul primar şi

acționează direct întreruptorul. Lamela bimetalică va avea o construcție specială pentru a elimina pe cît posibil influența inductivă.

Caracteristica acestei lamele bimetalice nu depinde de frecvență așa încît ea va lucra fidel funcție numai de valoarea eficace a curentului total, avînd o caracteristică dependentă de curent, ceea ce asigură și temporizarea respectivă.

13. PROTECȚIA CONTRA DEZECHILIBRULUI PE FAZE

Pentru a evita regimul de dezechilibru dintre faze al bateriei de condensatoare trebuie să se monteze o protecție contra dezechilibrului pe faze, cu acționarea la semnalizare. Protecția se realizează printr-un transformator de tensiune cu secundarul legat în triunghi deschis, în care este montat un aparat indicator.

14. APARATE INDICATOARE

Ca aparate indicatoare se prevăd pe lîngă aparatul care indică valoarea efectivă a curentului total, aparate pentru măsurarea armonicii fundamentale și a sumei celorlalte armonici.

15. CONCLUZII

La instalații de redresoare polifazate care absorb un curent deformat în care predomină armonicile 5, 7, 11, 13, compensarea puterii reactive simultan cu reducerea armonicilor de curent și tensiune în rețea, poate fi realizată prin circuite de filtrare, formate din baterii de condensatoare, montate în serie cu bobine de reactanță.

Soluția montării în paralel cu filtrele, a unei baterii de condensatoare fără reactanțe în serie nu este economică; dacă nu se prevăd filtre pentru toate armonicile mai importante din curba curentului absorbit de instalația de redresoare, o astfel de soluție poate conduce la rezonanță.

Numărul minim al circuitelor de filtrare necesare, este delimitat de factorul de distorsiune admisibil pentru tensiunea rețelei (fig. 2).

Pentru un număr de circuite de filtrare dat, parametrii nominali ai elementelor filtrelor rezultă dintr-un calcul tehnico-economic.

Protejarea instalațiilor electrice în care există armonici nu se poate asigura cu relee de curent conectate în secundarul condensatorului fără măsuri speciale.

Ca protecție tipică pentru astfel de instalații se utilizează protecția termică directă cu caracteristică de curent independentă de frecvență.

AUSGLEICH DER VERZERRUNGSERSCHEINUNGEN IN GLEICHRICHTERANLAGEN MIT KONDENSATORBATTERIEN

II. GRUNDSÄTZE FÜR DIE AUSWAHL DER KENNGRÖßEN VON SAUGKREISANLAGEN

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird eine technisch-ökonomische Methode zur Berechnung der Kenngrößen von Saugkreisanlagen angegeben. Falls die bei der Netzfrequenz an den Abnahmeschienen erforderliche Gesamtreaktivleistung bekannt ist, so ergibt sich deren Verteilung auf die Saugkreise verschiedener Ordnung aus der Bedingung geringster Kosten der Reaktanzspulen und der Kondensatorbatterien.

Wird gleichzeitig auch die wirtschaflichste Lösung der Leistungsfaktorverbesserung gesucht, so ergibt sich die erforderliche Gesamtreaktivleistung und deren Verteilung auf die Filterkreise aus einer Ertragsberechnung der entsprechenden Investition. Es wird erwiesen, daß die Aufstellung von Kondensatorbatterien (ohne Reihenreaktanz) in Parallelschaltung mit den Saugkreisen nicht wirtschaftlich ist.

Aus der Bedingung, daß der Verzerrungsfaktor den höchst zulässigen Wert nicht überschreitet, folgt eine untere Grenze der installierten Blindleistung, bzw. der Anzahl der Saugkreise.

Die Elemente der Saugkreise müssen jedenfalls unter Beachtung der zulässigen Überlastung gewählt werden.

Als Anwendung werden die Rechenergebnisse und die für eine Gleichrichteranlage eines großen metallurgischen Kombinates angenommene Lösung angeführt.

BIBLIOGRAFIE

1. C. I. BUDEANU, *Puissances réactives et fictives*. I.R.E. Inst. Romîn de energie, Bucureşti, 1927.
2. I. S. ANTONIU, *Funcţionarea wattmetrelor electrodinamice in regim deformant*. St. cerc. energ., **V**, *3—4*, 547—563 (1955).
3. C. BUDEANU, I. S. ANTONIU, M. POMÎRLEANU, *Funcţionarea motorului asincron în regim deformant de tensiune*. Comunic. Acad. R.P.R., *10* , 1026 (1958).
4. E. BORNITZ, M. HOFFMANN, G. LEINER, *Harmoniques dans les réseaux électriques et leur réduction au moyen de filtres*. Cigre, rap. *304* (1958).
5. Д. В. ТИМОФЕЕВ, Р. П. БИРЮКОВ, *Условия работы конденсаторов в поперечно-емкостных компенсационных установках*. Промышленная Энергетика. 12 (1961).
6. A. SCHMIDT Jr., *Capacitors in power systems with rectifier loads*. Tr. A.I.E.E., **72**, 14—17 (1953).

7. D. RUMPEL, *Die wechselstromseitigen Spannungsharmonischen eines Stromrichters bei idealer Sperresonanz des Netzes.* Arch. f. Elektronik, **XLVI**, *1*, 47—58 (1961).
8. M. HOFFMANN, *Die Belastung der Kondensators durch Oberschwingungen.* Elektrizitätswirtschaft, *56* (1957).
9. * * * *Электротехнический справочник.* Том I, стр. 390. Госэнергоиздат, Москва. 1956.
10. * * * *Electrical transmission and distribution.* Reference Book. Westinghouse Electric Corporation. Edition 4.00, 233—264 (1950).
11. * * * *Principiile metodologice de bază ale calculelor tehnico-economice în domeniul energeticii.* Economia de energie, **8**, *2* (1960).
12. * * * *Ministerul Energiei Electrice și Industriei Electrotehnice — Direcția generală tehnică.* Instrucțiunea nr. *38—55*; *Instrucțiuni pentru determinarea eficacității compensării puterii reactive.* Ed. energetică de stat, București, 1955.
13. E. ARIE, *Influența investițiilor din centrale asupra gradului optim de centralizare a producției de putere reactivă.* Energetica, **XI**, *11* (1961).

HIPERSTABILITATEA SISTEMELOR AUTOMATE CU MAI MULTE ELEMENTE NELINIARE*)

DE

V. M. POPOV

MEMBRU CORESPONDENT AL ACADEMIEI R.P.R.

621.52 : 621.3.016.352

În lucrări anterioare [1], [2] autorul a definit noțiunea nouă de hiperstabilitate și a stabilit criteriile necesare și suficiente de hiperstabilitate pentru o clasă particulară de sisteme automate conținînd un singur element neliniar, a căror parte liniară este descrisă printr-un sistem de ecuații diferențiale liniare, cu coeficienți constanți. Aceste rezultate pot fi extinse la sisteme mult mai generale atît în ceea ce privește partea liniară, cît și elementul, sau elementele, neliniare. În prezenta lucrare se efectuează o asemenea generalizare a teoriei hiperstabilității la cazul sistemelor avînd mai multe elemente neliniare. Despre partea liniară a sistemului se presupune, ca și în lucrările amintite, că este descrisă printr-un sistem de ecuații diferențiale liniar, cu coeficienții constanți. Pentru reducerea volumului lucrării, se tratează numai cazul hiperstabilității asimptotice, care prezintă de altfel, un mai mare interes în aplicații decît hiperstabilitatea simplă. Conținutul principal al lucrării constă în enunțarea și demonstrarea criteriilor necesare și suficiente de hiperstabilitate asimptotică pentru sistemele caracterizate mai sus. Ca și în lucrările anterioare, rezultatele obținute se caracterizează prin aceea că ele sînt aplicabile în cazul unor elemente neliniare foarte generale, avînd proprietatea că valoarea medie a produsului valorilor mărimilor de intrare și de ieșire păstrează un semn determinat în orice interval de timp. În

*) Comunicare prezentată la Consfătuirea asupra problemelor de automatizare din noiembrie 1962, organizată de Comisia de automatizări de pe lîngă Academia R.P.R.

particular, problema stabilității absolute poate fi tratată cu mijloacele teoriei hiperstabilității obținîndu-se pe această cale toate rezultatele cunoscute, dar cu o sferă de aplicație lărgită.

1. FORMULAREA PROBLEMEI

Se studiază sistemele automate a căror funcționare poate fi descrisă printr-un sistem de ecuații diferențiale de forma

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bf(t), \tag{1.1}$$

$$f(t) = \mathcal{F}\{x(t)\} \tag{1.2}$$

în care x — este un vector cu n componente,
$f(t)$ — este un vector cu m componente,
A — este o matrice pătrată n/n,
B — este o matrice cu n linii și m coloane.

Ecuația (1.1) descrie funcționarea părții liniare a sistemului. Ecuația (1.2) descrie faptul că vectorul $f(t)$ este o funcțională de soluția $x(t)$ a sistemului (1.1). În particular, relația (1.2) poate avea forma

$$f(t) = Rx, \quad (R = \text{matrice } m/n), \tag{1.3}$$

caz în care sistemul (1.1) — (1.3) devine un sistem liniar, cu coeficienți constanți. Un caz mai general este acela în care funcționala (1.2) are forma

$$f(t) = f(x), \tag{1.4}$$

în care $f(x)$ este o funcție vectorială neliniară de vectorul x. Cazul cel mai general înglobat în formula (1.2) este acela în care $f(t)$ nu depinde numai de valorile lui x la momentul t, ci depinde și de „trecut", adică de toate valorile luate de variabila x, la momente mai mici decît t. Astfel, ecuația (1.2) descrie funcționarea unei părți a sistemului care, în general este neliniară.

În relația (1.1) vectorul x poate fi interpretat ca fiind mărimea de ieșire a părții liniare a sistemului, $f(t)$ fiind mărimea de intrare a părții liniare. Analog, în relația (1.2) x reprezintă mărimea de intrare iar $f(t)$, mărimea de ieșire a părții neliniare a sistemului. Evident, aceste mărimi de intrare și de ieșire sînt în cazul nostru, mărimi vectoriale. Din punct de vedere fizic, atît partea liniară a sistemului cît și partea lui neliniară au mai multe intrări și ieșiri, vectorii x și $f(t)$ reprezentînd ansamblul valorilor mărimilor de intrare și ieșire.

În studiul hiperstabilității nu se particularizează dependența funcțională reprezentată de ecuația (1.2), rezultatele fiind aplicabile și în cazul în care nu dispunem de o descriere matematică exactă a funcționării părții neliniare a sistemului. Se presupune doar că dispunem de o cantitate

mică de informații referitoare la dependența (1.2) și anume, că se cunoaște o anumită funcție $y(t)$ (vector cu m componente) de forma

$$y = C\,x + D\,f(t), \tag{1.5}$$

astfel încît, oricare ar fi numărul pozitiv T să fie îndeplinită inegalitatea

$$\int_0^T (f(t))^* \, y(t)\,dt \leqslant \delta \sup_{0 \leqslant t \leqslant T} \| x(t) \| . \tag{1.6}$$

Se mai presupune că sînt îndeplinite condiții care asigură existența soluțiilor sistemului studiat. În expresia (1.5) C este o matrice m/n, iar D, o matrice m/m. În expresia (1.6), numărul δ este un număr pozitiv sau nul, care nu depinde de T. Numărul δ poate să depindă de condițiile inițiale pentru care se pune problema, sau de alți parametri determinînd în ansamblu „starea inițială" a sistemului. În expresia (1.6), ca și în tot restul lucrării, mărimile stelate de forma M^* sau f^*, reprezintă transpusele matricelor sau vectorilor M, respectiv f. În cazul în care matricea M sau vectorul f sînt mărimi complexe, stelarea acestor mărimi nu reprezintă numai operația de trecere la transpus, ci și operația de trecere la conjugatul complex al mărimilor respective.

Inegalitatea (1.6) poate fi privită ca o extensiune a condiției de reacție negativă, care intervine în teoria sistemelor liniare cu reacție. Inegalitatea (1.6) este însă mai puțin severă decît condiția de reacție negativă și poate fi mai ușor îndeplinită decît aceasta.

Ca o extensiune naturală a definițiilor de hiperstabilitate introduse în lucrările anterioare ale autorului, definim hiperstabilitatea sistemelor studiate aici în modul următor:

Definiția 1. Se va spune că soluția $x = 0$ a sistemului (1.1) este hiperstabilă în raport cu funcția $y(t)$ (1.5) (sau mai simplu că sistemul (1.1) — (1.5) este hiperstabil) dacă există o constantă pozitivă K astfel încît orice soluție a sistemului să verifice inegalitatea

$$\| x(t) \| \leqslant K (\| x(0) \| + \delta), \tag{1.7}$$

pentru orice funcție $f(t)$ care verifică inegalitatea (1.6).

În inegalitatea (1.7) δ este același număr ca și în (1.6).

Definiția 2. Se va spune că soluția $x = 0$ este asimptotic hiperstabilă în raport cu funcția $y(t)$ (sau mai simplu, că sistemul (1.1)—(1.5) este asimptotic hiperstabil) dacă are loc proprietatea de hiperstabilitate simplă, în sensul definiției 1 și dacă, în afară de aceasta, este verificată condiția

$$\lim_{t \to \infty} x(t) = 0, \tag{1.8}$$

pentru toate funcțiile $f(t)$ *mărginite* care verifică inegalitatea (1.6).

De notat faptul că în general, condiția suplimentară de mărginire a funcției $f(t)$ care intervine în definiția 2, este o consecință a hiperstabilității simple, care se presupune în enunțul definiției 2. Într-adevăr, din hiperstabilitatea simplă rezultă mărginirea vectorului x iar în relația (1.2) este natural să se presupună că pentru funcții $x(t)$ mărginite, $f(t)$ este de asemenea mărginită.

Pentru a reduce volumul lucrării, nu se va studia mai jos decît problema hiperstabilității asimptotice, ea prezentînd de altfel, un mai mare interes în aplicații decît hiperstabilitatea simplă.

2. ENUNȚUL CRITERIULUI NECESAR ȘI SUFICIENT PENTRU HIPERSTABILITATEA ASIMPTOTICĂ

Vom defini, în prealabil, „matricea de transfer" a sistemului (1.1) — (1.5) prin relația

$$G(s) = C(sE - A)^{-1}B + D, \tag{2.1}$$

în care E este matricea unitate n/n, s este o variabilă complexă, iar restul simbolurilor au aceleași semnificații ca și în sistemele (1.1) și (1.5). Matricea $G(s)$ are m linii și m coloane și este definită prin relația (2.1) pentru toate valorile lui s, exceptînd pe acelea care sînt totodată valori proprii pentru matricea A. Matricea $G(s)$ este denumită matrice de transfer, deoarece transformatele Laplace $L\{f\}$ și $L\{y\}$ ale mărimilor f și y în ipoteza condițiilor inițiale nule, verifică relația

$$L\{y\} = G(s)\, L\{f\} \tag{2.2}$$

(dacă bineînțeles aceste transformate există).

Se va presupune totodată că sistemul (1.1) — (1.5) verifică următoarele condiții de „nedegenerare":

I_1 — matricele $A^k B$, $k = 1, 2, \ldots, n-1, n$, sînt liniar independente. Cu alte cuvinte, pentru orice ansamblu de n numere, nu toate nule, α_k, $k = 1, 2, \ldots, n$, rangul matricei $\sum_{k=1}^{n} \alpha_k A^k B$ este egal cu m;

I_2 — matricele CA^k, $k = 1, 2, \ldots, n$, sînt liniar independente.

Aceste condiții reprezintă o extindere naturală a condițiilor de nedegenerare folosite în lucrările anterioare, frecvent întîlnite în literatura de specialitate.

Criteriul necesar și suficient de hiperstabilitate asimptotică este formulat în următoarea teoremă:

TEOREMĂ. *Pentru ca sistemul nedegenerat* (1.1) — (1.5) *să fie asimptotic hiperstabil, este necesar și suficient ca matricea* A *să nu aibă valori caracteristice cu părțile reale pozitive sau nule și matricea de transfer* $G(s)$ *a sistemului să aibă proprietatea că matricea hermitică*

$$H(\omega) = G(i\omega) + (G(i\omega))^*, \quad i = \sqrt{-1}, \tag{2.3}$$

să fie pozitiv definită (strict) pentru orice număr real ω.

3. DEMONSTRAREA NECESITĂȚII CONDIȚIILOR DIN TEOREMĂ

Să presupunem că sistemul nedegenerat (1.1) — (1.5) este asimptotic hiperstabil. În acest caz, în particular, oricare ar fi funcția $f(t)$ de forma

$$f(t) = b\,\varphi(t) \tag{3.1}$$

(în care b este un vector arbitrar diferit de zero iar $\varphi(t)$ este o funcție scalară de t) au loc condițiile (1.7) și (1.8) dacă funcția (3.1) verifică inegalitatea (1.6). Substituind (3.1) în (1.1) se obține sistemul :

$$\frac{dx}{dt} = A\,x + B\,b\,\varphi(t). \tag{3.2}$$

Introducînd noua mărime σ definită prin relația

$$\sigma = b^{*}\,Cx + b^{*}\,Df(t), \tag{3.3}$$

se observă că inegalitatea (1.6) capătă forma : (v. și 1.5)

$$\int_{0}^{T} \varphi(t)\,\sigma(t)\,dt < \delta \sup_{0 \leqslant t \leqslant T} \| x(t) \| . \tag{3.4}$$

Sistemul (3.2) — (3.3) este de tipul studiat în lucrările anterioare ale autorului fiind nedegenerat în sensul din lucrarea [2] după cum se arată ușor folosind condițiile I_1 și I_2. Din cele de mai sus, rezultă că soluțiile acestui sistem verifică relațiile (1.7) și (1.8) pentru orice funcție $\varphi(t)$ care verifică inegalitatea (3.4). În consecință sistemul (3.2) și (3.3) este asimptotic hiperstabil. Conform rezultatelor anterioare ale autorului, pentru aceasta este necesar și suficient ca funcția de transfer a sistemului (3.2) — (3.3) avînd expresia

$$\gamma(s) = b^{*}\,G(s)\,b \tag{3.5}$$

(unde $G(s)$ este dat de (2.1)) să nu aibă poli în semiplanul drept sau pe axa imaginară a planului s și să verifice inegalitatea

$$\mathcal{R}e\ \gamma(i\omega) > 0. \tag{3.6}$$

Din (3.5) și (3.6) întrucît vectorul b este arbitrar, rezultă condiția din teoremă referitoare la matricea (2.3). Condiția referitoare la matricea A rezultă din condiția menționată mai sus, referitoare la polii funcției de transfer (3.5).

De notat că deși aceste condiții sînt necesare și suficiente pentru hiperstabilitatea asimptotică a sistemului (3.2) și (3.3) raționamentele de mai sus demonstrează numai necesitatea acestor condiții pentru sistemul mai general (1.1), (1.5) întrucît prin relația (3.1) am particularizat forma funcției $f(t)$. Pentru a demonstra suficiența acestor condiții pentru funcții $f(t)$ arbitrare, este necesar să se efectueze niște raționamente de tipul celor care intervin în acest scop în lucrările anterioare ale autorului, dar prezentînd anumite particularități.

4. DEMONSTRAREA SUFICIENȚEI CONDIȚIILOR DIN TEOREMĂ

Considerăm o soluție oarecare a sistemului (1.1) (1.5) presupus nedegenerat și presupunem că funcția $f(t)$ verifică inegalitatea (1.6) și

că sînt verificate şi condiţiunile din teoremă. Pentru un număr pozitiv arbitrar T definim funcţia auxiliară

$$f_T(t) = \begin{cases} f(t) \text{ pentru } 0 \leqslant t \leqslant T, \\ 0 \text{ pentru } t < 0 \text{ şi pentru } t > T. \end{cases} \tag{4.1}$$

Considerăm de asemenea soluţia sistemului auxiliar:

$$\frac{du}{dt} = Au + Bf_T(t), \tag{4.2}$$

corespunzătoare condiţiilor iniţiale nule

$$u(0) = 0. \tag{4.3}$$

Introducînd şi soluţia sistemului

$$\frac{dv}{dt} = Av, \tag{4.4}$$

corespunzătoare condiţiilor iniţiale:

$$v(0) = x(0), \tag{4.5}$$

în care $x(0)$ reprezintă condiţiile iniţiale ale soluţiei studiate a sistemului (1.1) — (1.5) se vede uşor că este îndeplinită egalitatea

$$x = u + v, \text{ pentru } 0 \leqslant t \leqslant T. \tag{4.6}$$

Totodată, în virtutea condiţiilor din teoremă referitoare la A, rezultă că există constantele pozitive K_1, K_2 şi K_3 astfel încît să fie verificate inegalităţile

$$\|u(t)\| \leqslant K_1 e^{-K_2 t}, \tag{4.7}$$

$$\|v(t)\| \leqslant K_3 \|x(0)\| e^{-K_2 t}. \tag{4.8}$$

Totodată constanta K_1 depinde de A, $Bf(t)$ şi T iar constantele K_2 şi K_3 depind numai de matricea A.

În cele ce urmează se va nota transformata Fourier a unei mărimi oarecare m (scalar, vector, sau matrice) prin simbolul:

$$\overline{\overline{m}} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} m(t)\, dt \tag{4.9}$$

adică suprabarînd de două ori simbolul mărimii care se transformă.

Folosind mărimile şi convenţiile introduse mai sus, se calculează uşor, folosind formula lui Parseval, relaţia:

$$\int_{-\infty}^{\infty} (f_T(t))^* (C u(t) + D f_T(t))\, dt =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\overline{f}}_T^* G(i\omega) \overline{\overline{f}}_T d\omega = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\overline{f}}_T^* H(\omega) \overline{\overline{f}}_T d\omega. \tag{4.10}$$

Introducem acum matricea

$$M(t) = \begin{cases} C\, e^{At} B \text{ pentru } t > 0, \\ \frac{1}{2}(CB + B^* C^*) \text{ pentru } t = 0, \\ B^* e^{-A^* t} C^* \text{ pentru } t < 0. \end{cases} \tag{4.11}$$

Transformata Fourier a acestei matrici este

$$\overline{\overline{M}} = G(i\omega) + (G(i\omega))^* - D - D^*. \tag{4.12}$$

Cu ajutorul matricei $M(t)$ definim vectorul $w_T(t)$ prin relația

$$w_T(t) = \int_{-\infty}^{\infty} M(t-\tau) f_T(\tau)\, d\tau + (D + D^*) f_T(t). \tag{4.13}$$

Folosind (4.12) se obține

$$\overline{\overline{w}}_T = (G(i\omega) + (G(i\omega))^*) \overline{\overline{f}}_T, \tag{4.14}$$

de unde rezultă

$$\int_{-\infty}^{\infty} \| w_T(t) \|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\overline{f}}_T^* (H(\omega))^2 \overline{\overline{f}}_T\, d\omega. \tag{4.15}$$

Este ușor de văzut că, în condițiile teoremei, matricea H (2.3) este o funcție continuă de ω (pentru ω real) și că tinde către $D+D^*$ cînd ω tinde către infinit. Există deci o constantă pozitivă K_4 astfel încît matricea $\frac{1}{2}E - K_4 H(\omega)$ să fie pozitiv definită pentru orice ω. De aici și din faptul că H este pozitiv definită pentru orice ω rezultă că și matricea

$$\frac{1}{2}H - K_4 H^2, \tag{4.16}$$

este pozitiv definită, oricare ar fi ω. Folosind această concluzie și relațiile (4.10), (2.3) și (4.15) se obține inegalitatea

$$\int_{-\infty}^{\infty} (f_T(t))^* (C\, u(t) + D f_T(t))\, dt \geqslant K_4 \int_{-\infty}^{\infty} \| w_T(t) \|^2 dt. \tag{4.17}$$

Se observă acum folosind relațiile (4.1), (4.2), (4.3), (4.11) și (4.13) că pentru $t \geqslant T$ are loc relația

$$w_T(t) = C\, u(t) = C\, e^{A(t-T)} u(T), \quad t \geqslant T, \tag{4.18}$$

de unde rezultă

$$\int_T^{\infty} \| w_T(t) \|^2 dt = (u(T))^* \left(\int_T^{\infty} (e^{A(t-T)})^* C^* C e^{A(t-T)}\, dt \right) u(T) =$$

$$= (u(T))^* Q\, u(T). \tag{4.19}$$

Evident, integrala din (4.19) este pozitivă sau cel mult nulă, ultimul caz putînd avea loc numai dacă, pentru orice $t \geqslant T$ este îndeplinită condiția $w_T(t) = 0$. Folosind (4.18) și condiția de nedegenerare I_2, se demonstrează că acest caz poate avea loc numai dacă $u(T) = 0$. Aceste raționamente arată, în definitiv, că forma pătratică (4.19) este pozitiv definită. Există deci un număr pozitiv K_5 astfel încît să aibă loc inegalitatea:

$$K_4 \int_{-\infty}^{\infty} \| w_T(t) \|^2 dt \geqslant K_4 \int_T^{\infty} \| w_T(t) \|^2 dt = K_4 (u(T))^* Q\, u(T) \geqslant$$

$$\geqslant K_5 \| u(T) \|^2. \tag{4.20}$$

Mai departe, din relația (4.6) și din inegalitatea (4.8) se obține:

$$K_5 \| u(T) \|^2 \geqslant K_5 (\| x(T) \|^2 - 2 \| v(T) \| . \| x(T) \|) \geqslant K_5 \| x(T) \|^2 -$$

$$- K_6 \| x(0) \| . \| x(T) \| \geqslant K_5 \| x(T) \|^2 - K_6 \| x(0) \| \sup_{0 \leqslant t \leqslant T} \| x(t) \|,$$

$$(K_6 = 2 K_5 K_3), \tag{4.21}$$

inegalitate care comparată cu (4.20) conduce la

$$K_4 \int_{-\infty}^{\infty} \| w_T(t) \|^2 dt \geqslant K_5 \| x(T) \|^2 - K_6 \| x(0) \| \sup_{0 \leqslant t \leqslant T} \| x(t) \|. \tag{4.22}$$

Folosind acum relațiile (4.1) și (4.6) se obține

$$\int_{-\infty}^{\infty} (f_T(t))^* (C u(t) + D f_T(t))\, dt = \int_0^T (f(t))^* (y(t) - C v(t))\, dt \tag{4.23}$$

(v. și (1.5)). Ca și în lucrările anterioare ale autorului (v. Lema 3 din lucrarea [2]) se demonstrează inegalitatea:

$$-\int_{-\infty}^{\infty} (f(t))^* C v(t)\, dt \leqslant K_7 \| x(0) \| \sup_{0 \leqslant t \leqslant T} \| x(t) \|, \quad K_7 \geqslant 0, \tag{4.24}$$

folosind (4.4), (4.5), (1.1) și ipotezele referitoare la A. Din (4.23), (4.24) și (1.6) se obține

$$\int_{-\infty}^{\infty} (f_T(t))^* (C u(t) + D f_T(t))\, dt \leqslant (K_7 \| x(0) \| + \delta) \sup_{0 \leqslant t \leqslant T} \| x(t) \|. \tag{4.25}$$

Din inegalitățile (4.17), (4.22) și (4.25) se obține

$$\| x(T) \|^2 \leqslant K (\| x(0) \| + \delta) \sup_{0 \leqslant t \leqslant T} \| x(t) \|, \tag{4.26}$$

unde K este cel mai mare dintre numerele: $\dfrac{K_6 + K_7}{K_5}$ și $\dfrac{1}{K_5}$. Întrucît T este arbitrar inegalitatea (4.26) este verificată pentru orice T, de unde rezultă inegalitatea (1.7). Cu aceasta s-a demonstrat că în condițiile teo-

remei din prezenta lucrare, sistemul studiat posedă proprietatea de hiperstabilitate în sensul definiției 1 de la punctul 1.

Rămîne să arătăm că, în aceleași condiții, are loc și proprietatea (1.8) (hiperstabilitatea asimptotică).

În acest scop, se observă, folosind expresiile (2.1) și (2.3) și faptul că matricea $H(\omega)$ (2.3) este pozitiv definită, că există o constantă pozitivă K_8 astfel încît să aibă loc, pentru orice ω, inegalitatea : *)

$$H(\omega) > \frac{K_8}{|P(i\omega)|^2} E, \tag{4.27}$$

unde $P(s)$ este ecuația caracteristică a matricei A. Considerăm acum, pentru T pozitiv arbitrar, sistemul auxiliar

$$\frac{\mathrm{d}\, z_j^T}{\mathrm{d}t} = z_{j+1}^T, \; j = 1, 2, \ldots, n-1. \tag{4.28}$$

$$\frac{\mathrm{d}\, z_n^T}{\mathrm{d}t} = -\sum_{j=1}^{n} a_j \cdot z_j^T + f_T(t), \tag{4.29}$$

În acest sistem mărimile z_j^T, $j = 1, 2, \ldots, n$ sînt vectori cu m componente. În ecuația (4.29) a_j sînt numere pozitive, reprezentînd coeficienții ecuației caracteristice $P(s) = 0$ a matricei A. Se vor folosi soluțiile $z_j^T(t)$ ale sistemului (4.28), pentru condiții inițiale nule. Se vede ușor că transformata Fourier a vectorului $z_1^T(t)$ are expresia

$$\overline{\overline{z_1^T}} = \frac{1}{P(i\omega)} \overline{\overline{f_T}}. \tag{4.30}$$

La aplicarea transformatei Fourier, mărimea se definește ca fiind egală cu zero pentru $t < 0$. Din (4.30) rezultă egalitatea

$$\int_{-\infty}^{\infty} \| z_1^T \|^2 \, \mathrm{d}t = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{|P(i\omega)|^2} \| \overline{\overline{f_T}} \|^2 \, \mathrm{d}\omega. \tag{4.31}$$

Din (4.10), (4.27), (4.25), (1.7) și (4.31) rezultă inegalitatea

$$\int_{-\infty}^{\infty} \| z_1^T \|^2 \, \mathrm{d}t \leqslant K_9, \tag{4.32}$$

unde K_9 este un număr care nu depinde de T. Notăm acum cu $z_j(t)$ soluția, cu condiții inițiale nule, a unui sistem care diferă de sistemul (4.28), (4.29) doar prin faptul că se înlocuiește $f_T(t)$ cu $f(t)$. În acest caz, au loc relațiile

$$\frac{\mathrm{d}z_j}{\mathrm{d}t} = z_{j+1}, \; j = 1, 2, \ldots, n-1, \tag{4.33}$$

*) În sensul că matricea $H(\omega) - \frac{K_8}{|P(i\omega)|^2} E$ este pozitiv definită pentru orice ω.

$$\frac{dz_n}{dt} = -\sum_{j=1}^{n} a_j z_j + f(t). \tag{4.34}$$

Evident, are loc relația

$$z_j(t) = z_j^T(t) \text{ pentru } 0 \leqslant t \leqslant T. \tag{4.35}$$

Toate rădăcinile ecuației caracteristice a sistemului (4.33) (4.34) sînt în același timp rădăcini ale polinomului $P(s)$ deci valori caracteristice ale matricei A. Prin urmare, părțile lor reale sînt negative. De aici rezultă, ținînd seama și de faptul că funcția $f(t)$ este mărginită (v. definiția 2), că soluțiile considerate $z_j(t)$ sînt funcții mărginite și uniform continue de timp. Pe această bază se deduce din (4.32) și (4.35) concluzia

$$\int_0^T \| z_1 \|^2 \, dt \leqslant K_9, \tag{4.36}$$

de unde întrucît K_9 nu depinde de T (v. lema 1 din [3])

$$\lim_{t \to \infty} z_1(t) = 0. \tag{4.37}$$

Din relațiile (4.33) și (4.37) și din faptul că funcțiile $z_j(t)$ sînt mărginite și uniform continue, rezultă concluzia

$$\lim_{t \to \infty} z_j(t) = 0, \; j = 1, 2, \ldots, n \, . \tag{4.38}$$

(v. Lema 4 din lucrarea [2]). Relația (4.34) permite în acest caz să se exprime $f(t)$ ca o combinație liniară de mărimi z_j și $\frac{dz_n}{dt}$, bucurîndu-se de proprietatea (4.38). Substituind pe $f(t)$ dat de (4.34) în (1.1) se poate scrie expresia lui $x(t)$ sub forma

$$x(t) = e^{At} x(0) + \sum_{j=1}^{n} a_j \int_0^t e^{A(t-\tau)} B z_j(\tau) \, d\tau + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B \frac{dz_n(\tau)}{d\tau} \, d\tau. \tag{4.39}$$

În baza proprietăților matricei A și a relațiilor (4.38) se deduce că primul termen și termenii centrali din (4.39) tind către zero cînd t tinde la infinit (pentru termenii centrali acest lucru rezultă aplicînd regula lui Hospital). După o integrare prin părți, ultimul termen din (4.39) se aduce la forma :

$$B z_n(t) - e^{At} B z_n(0) + \int_0^t A e^{A(t-\tau)} B z_n(\tau) \, d\tau, \tag{4.40}$$

de unde rezultă că și ultimul termen din (4.39) tinde către zero. Se obține astfel concluzia (1.8) astfel încît teorema enunțată la punctul 2 este complet demonstrată.

★

În încheiere, menționăm că deși în lucrare s-a folosit de repetate ori cuvîntul „neliniar", rezultatele lucrării rămîn valabile, în particular și pentru sistemele liniare. Fiind dată o problemă concretă de stabilitate, există în general mai multe modalități de a o încadra în teoria hiperstabilității. Se demonstrează că dacă sistemul studiat tinde către un sistem liniar și cu coeficienți constanți și dacă problema stabilității este adecvat încadrată în teoria hiperstabilității, criteriile de hiperstabilitate tind către criteriile cunoscute, necesare și suficiente, pentru stabilitatea acestor sisteme. Aceste aspecte, ca și extinderea teoriei la sisteme a căror parte liniară este descrisă prin ecuații mai generale decît cele presupuse în prezenta lucrare, necesită însă o tratare specială.

THE HYPERSTABILITY OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS WITH SEVERAL NON-LINEAR ELEMENTS

ABSTRACT

The hyperstability theory is extended to the case of certain automatic systems containing a linear part and several non-linear elements. The necessary and sufficient criterion for the asymptotic stability of the system is stated and proved. In this criterion the main condition is expressed in terms of the transfer matrix of the linear part of the system investigated.

BIBLIOGRAFIE

1. V. M. POPOV, *Criterii de stabilitate pentru sistemele automate conținînd elemente neunivoce*. Probleme de automatizare, Ed. Acad. R.P.R., 1960.
2. В. М. ПОПОВ, *Решение новой задачи устойчивости регулируемых систем*. Автоматика и Телемеханика, *1* (1963).
3. I. BARBĂLAT, *Systèmes d'équations différentielles d'oscillations non linéaires*. Revue de Mathématiques pures et appliquées, Acad R.P.R., *4*, *2*, 267—270 (1959).

CALCULATORUL ANALOGIC NELINIAR MECAN-II

DE

V. M. POPOV

MEMBRU CORESPONDENT AL ACADEMIEI R.P.R.

N. N. TĂTARU și T. M. BĂJENESCU

518.5 : 621.316.8

În cadrul Institutului de energetică al Academiei R.P.R. s-a abordat, începînd din anul 1956, problema construirii unor calculatoare analogice, în scopul de a înzestra baza materială necesară cercetărilor cu noi auxiliare de calcul. Într-o primă etapă, colectivul laboratorului de automatizări al Institutului a conceput, proiectat și realizat calculatorul analogic MECAN-I, dat în exploatare cu întreaga lui capacitate de lucru în anul 1960. Ulterior, calculatorul MECAN-I a fost folosit la rezolvarea a numeroase probleme în special în domeniul electroenergeticii, deși numărul redus de amplificatoare operaționale (32) și dificultatea de a simula caracteristici neliniare cu ajutorul acestui calculator a reprezentat o limitare a complexității problemelor rezolvabile cu ajutorul lui. Această limitare făcîndu-se din ce în ce mai puternic simțită de-a lungul timpului, s-a hotărît, la începutul anului 1961, să se construiască un calculator analogic de capacitate sporită, înzestrat cu un număr suficient de mare de elemente neliniare, capabil să rezolve, în principal, problemele legate de studiul repartiției automate optime a sarcinilor între centralele electrice. Pe această bază s-a trecut imediat la proiectarea calculatorului MECAN-II, iar ulterior, începînd din trimestrul IV—1961, la construirea acestuia. Spre deosebire de calculatorul MECAN-I, care a fost construit în întregime cu forțele proprii ale Institutului, construirea calculatorului MECAN-II a fost încredințată Uzinelor „Electronica" (pentru partea electronică a calculatorului) și Întreprinderii de material didactic (pentru părțile mecanice ale acestuia). Construirea calculatorului, efectuată sub controlul permanent al Institutului de energetică, a durat aproximativ un an.

În prezenta lucrare se vor prezenta pe scurt principalele caracteristici ale calculatorului MECAN-II, scoţînd în evidenţă în special elementele cu un mai pronunţat caracter de originalitate, care îl diferenţiază de calculatoarele analogice existente.

Calculatorul MECAN-II dispune de un număr de 96 amplificatoare operaţionale, depăşind de trei ori, din acest punct de vedere, capaci-

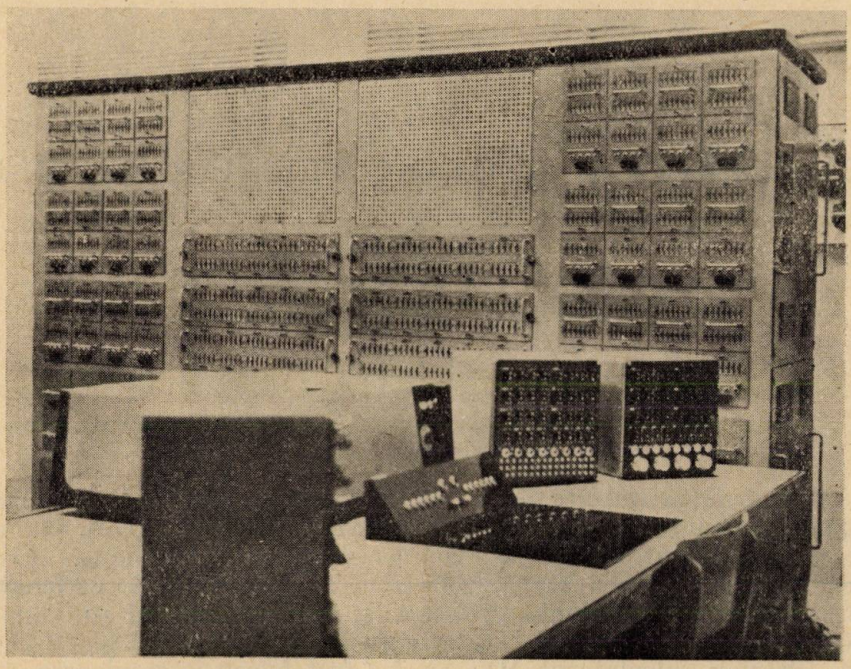


Fig. 1. — Vedere din faţă a calculatorului eletronic MECAN-II (incluzînd şi pupitrul de comandă).

tatea de 32 amplificatoare operaţionale pe care o are calculatorul MECAN-I. Întrucît este prevăzută posibilitatea cuplării calculatoarelor MECAN-I şi MECAN-II, ansamblul acestor calculatoare va avea o capacitate de 128 amplificatoare operaţionale, permiţînd prin aceasta rezolvarea unor probleme complexe cu mai multe zeci de necunoscute.

Un număr de alte 32 amplificatoare operaţionale sînt rezervate pentru obţinerea unor tensiuni de referinţă necesare funcţionării calculatorului şi, ca urmare, nu pot fi folosite direct în calcule.

Calculatorul dispune în plus de un număr de 24 elemente neliniare universale, realizate cu diode şi de 24 elemente de înmulţire, realizate pe principiul modulaţiei de amplitudine şi durată a impulsurilor.

Coeficienţii problemelor care se rezolvă sînt fixaţi cu ajutorul a 108 rezistenţe decadice, permiţînd varierea comodă şi precisă a rezisten-

țelor de calcul între limitele de 100 Ω și 10 MΩ. Dintre aceste decade, un număr de 32 sînt realizate cu rezistențe bobinate pentru domeniul : 100 Ω 1 la M Ω. Interconexiunea elementelor de calcul se poate realiza cu ajutorul a două panouri de interconexiuni avînd cîte 1 064 borne.

Capacitatea mare de calcul a calculatorului a ridicat probleme speciale în legătură cu alimentarea lui cu energie electrică. În locul soluției

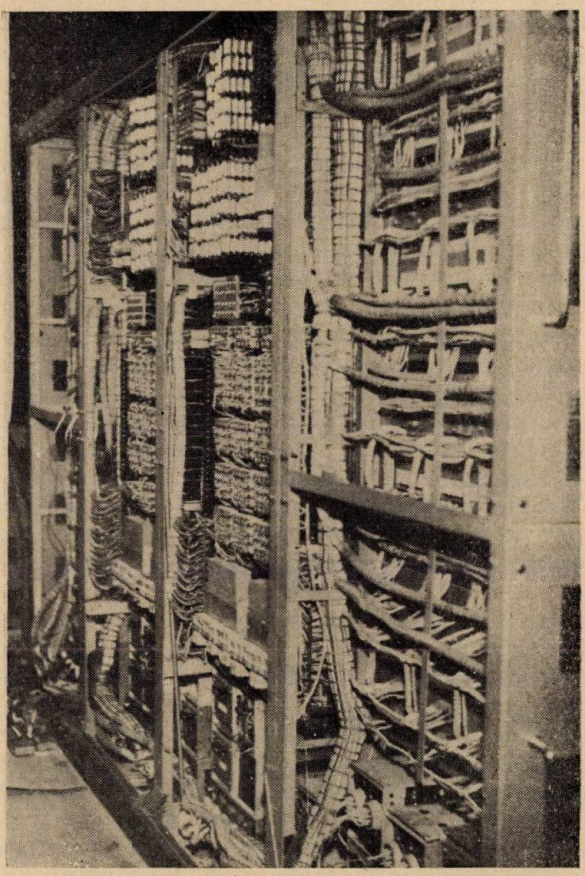


Fig. 2. — MECAN-II ; vedere din spate.

uzuale, de a prevede un număr cît mai mic de surse stabilizate de mare putere, s-a preferat să se construiască un număr mare de surse stabilizate, ceea ce a permis reducerea puterii debitate de fiecare sursă. Astfel, amplificatorul operațional al calculatorului este alimentat de 11 tensiuni stabilizate electronic (dintre care una servește la alimentarea filamentului etajului de intrare). Această soluție, care pare a fi improprie pentru calculatoarele de mică amploare, devine din mai multe puncte de vedere

foarte indicată în cazul calculatoarelor mari. În afară de avantajul reducerii puterii surselor individuale, menţionat mai sus, această soluţie dă noi grade de libertate în ceea ce priveşte reglajul amplificatoarelor. Prin varierea independentă a unui număr mare de tensiuni de alimentare, pot fi compensate anumite abateri ale rezistenţelor din amplificatoare de la valorile precalculate. Această corecţie se poate efectua şi pentru abateri relativ mari ale valorilor rezistenţelor, cu singura condiţie ca toate amplificatoarele calculatorului să fie identice. Pentru a slăbi şi această din urmă restricţie, s-au împărţit amplificatoarele operaţionale în două grupuri şi s-au prevăzut încă două surse stabilizate pentru compensarea abaterilor între cele două grupuri.

Cele 13 tensiuni stabilizate electronic ale calculatorului folosesc, ca element de stabilizare, un amplificator operaţional de construcţie specială, prevăzut cu dispozitiv de stabilizare automată a nulului. Evident, condiţiile impuse performanţelor acestor amplificatoare sînt mai reduse. Dacă amplificatoarele operaţionale ale calculatorului au un factor de amplificare în curent continuu de peste 100 000 iar în curent alternativ de circa 1 500, amplificatoarele folosite la stabilizarea tensiunilor au o amplificare în curent continuu de circa 2 500 şi în curent alternativ, de circa 1 500. Introducerea dispozitivelor de reglare automată a nulului în lanţul de amplificare al circuitelor de stabilizare a surselor, deşi este o soluţie neuzuală, prezintă avantajul unei mai precise fixări a tensiunilor stabilizate, rezistenţa internă a redresoarelor în curent continuu reducîndu-se la sutimi de ohm. În acelaşi timp, această soluţie permite o mai sensibilă semnalizare a defectelor de funcţionare ale stabilizatoarelor, preluînd tensiunea de semnalizare a defectelor de la ieşirea amplificatorului de alternativ, după cum se procedează în mod curent la amplificatoarele operaţionale.

Puterea mare absorbită de la reţea de către calculator (circa 12 kW) şi faptul că foloseşte pentru redresoare diode cu germaniu au impus introducerea unui sistem special de ventilaţie şi de condiţionare a camerei în care este instalat.

Pentru o cît mai stabilă funcţionare a amplificatoarelor calculatorului, s-a prevăzut stabilizarea tensiunilor de alimentare a filamentelor tuburilor. După cum s-a mai arătat, filamentele tuburilor de intrare sînt alimentate în curent continuu stabilizat. Filamentele celorlalte tuburi sînt alimentate în curent alternativ, stabilizat cu ajutorul unui stabilizator dispus pe reţeaua de alimentare a calculatorului.

Întrucît problema programării calculatorului devine mai dificilă pe măsură ce creşte capacitatea acestuia, s-a acordat o deosebită atenţie tuturor măsurilor capabile să simplifice punerea problemelor pe calculator. În acest scop, în afară de panourile centrale de interconexiuni, a căror utilizare devine greoaie în cazul problemelor complexe, s-au introdus o serie de organe speciale permiţînd interconectarea locală a unui grup redus de amplificatoare formînd celule cu funcţii speciale. Aceste interconexiuni locale se efectuează între următoarele elemente care intră în componenţa unei asemenea *celule de calcul*: 4 amplificatoare operaţionale, un element neliniar universal, un element de înmulţire, un comutator

electronic de precizie, 2 rezistențe în decade, 7 rezistențe bobinate de cîte 100 kΩ și două *grupuri integratoare*, formate din cîte un condensator styroflex de 1 μF împreună cu releele care comandă operația de integrare. Interconexiunile dintre aceste elemente se realizează cu ajutorul a 7 comutatoare dispuse pe partea din față a unui șasiu în care sînt dispuse cea mai mare parte a elementelor *celulei de calcul*. În funcție de pozițiile acestor comutatoare, celula de calcul poate rezolva : ecuații diferențiale liniare și neliniare, realizarea unei funcții neliniare arbitrare, înmulțirea a două variabile, funcția de comutator electronic de precizie, caracteristici cu porțiuni de saturație, zone de insensibilitate, histerezis etc. Cum pozițiile celor 7 comutatoare sînt univoc determinate de un număr cu 7 cifre, rezultă că fiecare dintre funcțiile amintite ale celulei de calcul coresunde unui anumit număr cu 7 cifre, corespondența fiind înregistrată într-un catalog de *subprograme*. Acest sistem neobișnuit de a programa un calculator analogic, prezintă avantajul de a reduce la minimum conexiunile care trebuie realizate prin intermediul panoului de interconexiuni, a căror efectuare este greoaie și reprezintă o sursă de erori. Unele probleme pot fi programate fără a recurge de loc la panourile de interconexiuni. În acest din urmă caz, o programare a calculatorului este reprezentată de un șir de numere de cîte 7 cifre, fiecare număr reprezentînd programarea unei celule de calcul. *Punerea problemei pe calculator* constă în acest caz în simpla fixare a comutatoarelor pe pozițiile corespunzătoare numerelor care reprezintă *programul*.

Un sistem analog de fixare a subprogramelor a fost folosit la realizarea elementelor neliniare universale. Caracteristicile neliniare sînt fixate cu ajutorul a 14 comutatoare care permit reglarea pantelor caracteristicilor. Un asemenea element neliniar universal permite realizarea acelor caracteristici care sînt formate din 14 porțiuni de linii drepte. Deși numărul total al caracteristicilor distincte care pot fi realizate cu un singur element neliniar universal este foarte mare (de ordinul cîtorva sute de mii) totuși aceste caracteristici prezintă limitarea importantă că panta lor trebuie să fie monotonă. Eliminarea acestei dificultăți se realizează prin combinarea a două sau mai multe elemente neliniare universale, ceea ce permite, de altfel și ridicarea preciziei de reproducere a caracteristicii neliniare date. Elementul neliniar universal folosit în calculatorul MECAN-II, diferă de elementele neliniare universale utilizate în alte calculatoare analogice prin faptul că pantele caracteristicilor neliniare nu se reglează prin modificarea unor rezistențe, ci prin modificarea unor tensiuni de referință. Aici apare iarăși un caz în care o soluție nejustificată tehnic pentru un calculator mic, devine indicată pentru un calculator de mari proporții. Într-adevăr, pentru obținerea tensiunilor de referință necesare pentru elementele neliniare universale se imobilizează, după cum s-a arătat deja mai sus, un număr de 32 amplificatoare operaționale ale calculatorului. Faptul că aceste tensiuni de referință servesc la alimentarea a 24 elemente neliniare universale și că ele servesc ca referințe și pentru alte probleme, face ca soluția să devină totuși indicată. Principalul avantaj al acestui sistem constă în ușurința fixării caracteristicilor neliniare (care se înregistrează de asemenea într-un catalog, sub forma unui număr de 14 cifre)

caracteristicile fiind în acelaşi timp uşor şi precis reproductibile. Totodată toate rezistenţele care intervin în elementul neliniar pot fi luate egale între ele ceea ce uşurează sensibil procesul de fabricaţie. Evident, faptul că tensiunile de referinţă nu variază continuu, ci în trepte, introduce o limitare în ceea ce priveşte clasa de elemente neliniare care pot fi realizate. Pentru cazuri speciale, este prevăzută posibilitatea introducerii unor tensiuni speciale de referinţă, prin panoul de interconexiuni. Soluţia combinării mai multor elemente neliniare de precizie mică pentru a obţine un element neliniar de precizie mai mare este însă satisfăcătoare în marea majoritate a cazurilor.

O soluţie asemănătoare s-a adoptat şi în cazul elementelor de înmulţire : cele 24 elemente de înmulţire pot fi grupate cîte două formînd 12 grupuri de înmulţire de înaltă precizie (cu reacţie). Generarea impulsurilor necesare efectuării produselor este efectuată cu ajutorul unui generator unic pe întregul calculator, realizat cu ajutorul unor amplificatoare operaţionale şi generînd cu mare precizie tensiunea de forma necesară.

Siguranţa în funcţionare fiind de maximă importanţă în cazul unui calculator de mai mari proporţii, această problemă a stat în permanenţă în centrul atenţiei constructorilor. Întrucît s-a constatat că elementele cele mai sensibile sînt vibratoarele de la intrarea şi ieşirea lanţului de alternativ al amplificatoarelor operaţionale, s-au dispus cîte două vibratoare pe fiecare amplificator : unul la intrare şi unul la ieşire. Această soluţie prezintă avantajul unui contact mai sigur, permiţînd totodată reducerea sensibilă a cuplajului dintre intrarea şi ieşirea amplificatorului de curent altenativ, care, în cazul soluţiei uzuale a dispunerii unui singur vibrator, reprezintă frecvent o cauză de oscilaţii parazite.

Întrucît măsurile luate pentru mărirea la maximum a siguranţei în funcţionare nu vor fi totuşi, evident, suficiente pentru eliminarea totală a defecţiunilor, s-a acordat o deosebită grijă sistemelor de semnalizare a erorilor. S-a prevăzut posibilitatea controlării funcţionării corecte a fiecărui element al calculatorului fără a fi necesară scoaterea lui din calculator, prin simpla introducere a mufei unui aparat de control în mufe speciale dispuse pe elemente. Această soluţie a implicat o construcţie specială a amplificatoarelor operaţionale, încorporînd capacităţile parazite ale legăturilor necesare controlului în circuitele de stabilizare ale amplificatoarelor, eliminînd astfel oscilaţiile parazite care apar la efectuarea întîmplătoare a conexiunilor de control.

În afară de verificarea funcţionării corecte a elementelor calculatorului, s-a prevăzut posibilitatea controlării corectitudinii programării acestuia.

În acest scop, după punerea problemei pe calculator, se împarte programul pe porţiuni şi se verifică funcţionarea corectă a fiecărei părţi. Această operaţie se efectuează fără a modifica interconexiunile calculatorului, prin simpla manipulare a unor chei telefonice dispuse special în acest scop pe un pupitru de comandă comun pentru ambele calculatoare.

Pupitrul de comandă conţine, în afară de aceasta, un înregistrator $x - y$, elemente de comandă, control şi semnalizare, mici panouri de interconexiuni, 8 rezistenţe în decade, 30 de potenţiometri, ceea ce per-

mite efectuarea comodă a operațiilor de verificare și rezolvare a problemelor.

Reflectînd maturizarea tehnicii calculului analogic în țara noastră, calculatorul MECAN-II va servi la rezolvarea unei categorii de probleme mult mai largi decît se preconiza inițial. Datorită structurii sale complexe, MECAN-II va rezolva nu numai problemele de regimuri tranzitorii și optimizare ridicate de sistemul electroenergetic, ci și probleme care presupun funcționarea secvențială automată a calculatorului, probleme de optimizare automată și de simulare a unor sisteme automate autoadaptative, permițînd astfel efectuarea unor cercetări de laborator într-un domeniu de mare actualitate al automaticii.

O expunere mai amănunțită a construcției și modului de funcționare a calculatorului va constitui obiectul altor lucrări.

THE NON-LINEAR ANALOG COMPUTER MECAN-II

ABSTRACT

A brief description is given of the non-linear analog computer MECAN-II built in the „Energetics institute" and equipped with 96 operational amplifiers, 24 non-linear elements and 24 multiplying elements.

Stress is laid on the specific parts on the computer such as: programming by comutators, fixing non-linear characteristics by step-change of certain reference voltages, etc.

O METODĂ DE CALCUL AL IMPEDANȚELOR DE TRANSFER ALE UNEI REȚELE ELECTRICE UTILIZÎND MAȘINILE ELECTRONICE ANALOGICE

DE

M. POMÎRLEANU și E. ARIE

621.316.1.011.3—523.2 : 518.5

1. După cum se cunoaște, matricea impedanțelor de transfer ale unei rețele $\|Z\|$ este inversa matricei de admitanță $\|Y\|$

$$\|Z\| = \|Y\|^{-1} \tag{1}$$

și deci pentru calculul elementelor matricei $\|Z\|$ este necesară rezolvarea ecuației matriciale

$$\|Y\| \cdot \|Z\| = 1. \tag{2}$$

Avînd în vedere faptul că elementele matricei $\|Y\|$ sînt mărimi complexe, $Y_{ij} = G_{ij} - jB_{ij}$, este necesar pentru calculul la mașină analogică transformarea ecuației (2), astfel încît să apară numai mărimi reale. Ecuația (2) se poate scrie cu ajutorul submatricilor $\|G\|$ și $\|B\|$ astfel

$$\left\|\begin{array}{c|c} G & -B \\ \hline B & G \end{array}\right\| \cdot \left\|\begin{array}{c|c} R & X \\ \hline -X & R \end{array}\right\| = \left\|\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ \hline 0 & 1 \end{array}\right\| \tag{3}$$

unde $\|R\|$ și $\|X\|$ sînt submatricile corespunzătoare elementelor reale și imaginare ale matricei $\|Z\|$. Se observă că ordinul matricei s-a dublat și deci pentru găsirea pe cale analitică a matricei inverse $\|Z\|^{-1}$ este necesară, pentru o rețea cu n noduri rezolvarea de $2n$ ori a unor sisteme de ecuații cu $2n$ necunoscute. Ținînd seama de caracteristicile matricei compuse $\|Z\|$ (antisimetrică în reprezentarea prin submatrice și fiecare submatrice simetrică) se poate reduce

ordinul sistemului de ecuaţii la jumătate prin premultiplicarea membrului stîng şi drept din (3) cu transpusa matricei compuse $\|Y\|$. Se obţine după efectuarea calculelor, relaţia (4)

$$\left\|\begin{array}{c|c} G^2+B^2 & 0 \\ \hline 0 & G^2+B^2 \end{array}\right\| \cdot \left\|\begin{array}{c|c} R & X \\ \hline -X & R \end{array}\right\| = \left\|\begin{array}{c|c} G & B \\ \hline -B & G \end{array}\right\| \tag{4}$$

şi apoi imediat după înmulţirea celor două matrici din membrul stîng şi identificarea submatricelor, ecuaţiile matriceale (5) şi (6)

$$\|G^2 + B^2\| \cdot \|R\| = \|G\|, \tag{5}$$

$$\|G^2 + B^2\| \cdot \|X\| = \|B\|. \tag{6}$$

S-au obţinut deci $2n$ sisteme de ecuaţii care însă sînt numai de ordinul n avînd aceeaşi matrice de coeficienţi. Acest lucru permite ca să se poată determina pe o maşină analogică dată matricea impedanţelor unui sistem cu număr dublu de noduri, în raport cu o rezolvare directă după ecuaţia (3).

De asemenea, aşa cum se va vedea mai departe, se lucrează cu o matrice a coeficienţilor totdeauna pozitiv definită îndeplinindu-se automat una din condiţiile cerute de rezolvare pe maşină analogică.

2. Deşi calculatoarele analogice sînt mai puţin adecvate pentru rezolvarea sistemelor algebrice liniare decît calculatoarele electronice cifrice, totuşi în practică la studiul unor probleme complexe în care intervin atît ecuaţii diferenţiale cît şi ecuaţii algebrice utilizarea calculatoarelor electronice analogice poate să prezinte interes. Dar în acest caz pe lîngă problemele legate de capacitatea şi viteza de rezolvare, apare ca o chestiune esenţială, problema stabilităţii schemei. De asemenea, este necesară o evaluare anticipată a erorilor sistematice apărute la introducerea datelor pe maşină cît şi a celor datorate coeficientului finit de amplificare al amplificatorilor operaţionali pentru a şti dacă cu maşina existentă şi cu schema utilizată, este posibilă o rezolvare mulţumitoare a sistemelor de ecuaţii algebrice date.

În metodele directe de rezolvare pe maşina analogică, sistemul de ecuaţii de forma

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}\, x_j - b_i = 0 \tag{7}$$

este modelat direct cu ajutorul a n amplificatori operaţionali utilizaţi ca sumatori fiecare modelînd cîte o ecuaţie (7), după schema din figura 1.

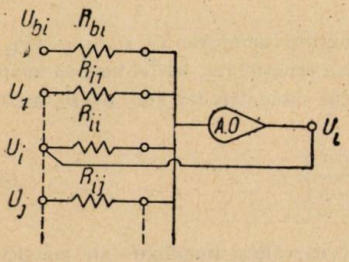


Fig. 1. — Schema amplificatorului operaţional lucrînd ca sumator.

Pentru a obţine coeficienţii negativi, mai sînt necesari maximum n amplificatori operaţionali utilizaţi ca inversori.

Se poate demonstra că pentru a putea rezolva pe această cale sistemul de ecuaţii (7) şi deci a avea stabilitatea asigurată este necesară îndeplinirea prealabilă a următoarelor 3 condiţii:

a) amplificatorii să aibă o margine de fază mai mică decît 90°;

b) matricea coeficienţilor sistemului să fie pozitiv definită;

c) coeficienţii a_{ij} să fie mai mici ca unitatea în valoare absolută.

Condiţia *a*) trebuie să fie îndeplinită prin construcţia amplificatoarelor; condiţia *b*) şi *c*) trebuie să fie realizată prin prelucrarea coeficienţilor sistemului.

O cale pentru a obține un sistem de ecuații cu matricea coeficienților pozitiv definită este de a preînmulți membrul sting și membrul drept al ecuației matriceale corespunzătoare sistemului (7)

$$\|A\| \cdot \|X\| = \|b\|. \tag{8}$$

cu transpusa matricei coeficienților $\|A_t\|$ obținîndu-se ecuația

$$\|C\| \cdot \|X\| = \|d\|, \tag{9}$$

unde

$$\|C\| = \|A_t\| \cdot \|A\|$$

și

$$\|d\| = \|A_t\| \cdot \|b\|.$$

Matricea $\|C\|$ este totdeauna o matrice pozitiv definită. O metodă mai sigură de realizare a stabilității constă în rezolvarea cu ajutorul ecuațiilor diferențiale [4]. În locul rezolvării sistemului (8) se rezolvă sistemul (10) (vezi fig. 4).

$$\|\dot{X}\| = \|A_t\| \cdot (\|A\| \|X\| - \|b\|), \tag{10}$$

unde $\|\dot{X}$ es e matricea unicoloană a derivatelor în raport cu timpul a necunoscutelor x.

$\|A_t\|$ — *transpusa matricei* $\|A\|$*)

Pentru regimul staționar $\|\dot{X}\| \equiv 0$ și deci soluția obținută este chiar soluția sistemului (8). Se cunosc și alte metode directe de rezolvare a sistemelor de ecuații algebrice liniare pe mașinile electronice analogice care nu se vor mai prezenta în articolul de față ele nefiind utilizate în aplicațiile noastre [5], [6].

Pentru a evalua erorile ce pot apărea la rezolvarea sistemelor de ecuații algebrice liniare pe mașinile electronice analogice, utilizînd atît metodele directe cît și cele iterative, vom analiza două surse de erori posibile: erori datorită coeficientului finit de amplificare al amplificatoarelor operaționale și erori datorită reglării imprecise a rezistențelor de lucru [7].

Prima grupă de erori o vom analiza pe schema de lucru a amplificatorului operațional funcționînd ca sumator deoarece pentru regim staționar funcționarea acestuia este similară (în schemele utilizate aici) cu aceea a amplificatorului lucrînd ca integrator (rezistența condensatorului este mult mai mare decît rezistența de reacție cu care este în paralel).

Astfel din figura 2 rezultă

$$U_e = -\frac{\sum_i \frac{R_r}{R_i} U_i}{1 + \frac{1}{K}\left(1 + \sum_i \frac{R_r}{R_i}\right)}. \tag{11}$$

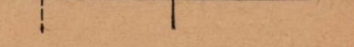


Fig. 2. — Schema de determinarea erorilor amplificatorilor operaționali.

Pe de altă parte, valoarea presupusă pentru U_e este

$$U_e' = \sum_i \frac{R_r}{R_i} U_i \tag{12}$$

*) În unele situații se poate pune în locul matricii $\|A_t\|$ o matrice diagonală ale cărei elemente sînt ± 1.

şi deci eroarea relativă devine

$$\frac{U_e' - U_e}{U_e} = \frac{-\sum_i \frac{R_r}{R_i} U_i + \frac{\sum \frac{R_r}{R_i} U_i}{1 + \frac{1}{K}\left(1 + \sum_i \frac{R_r}{R_i}\right)}}{\sum_i \frac{R_r}{R_i} U_i} = \frac{1}{K}\left(1 + \sum_i \frac{R_r}{R_i}\right). \tag{13}$$
$$- \frac{\sum_i \frac{R_r}{R_i} U_i}{1 + \frac{1}{K}\left(1 + \sum \frac{R_r}{R_i}\right)}$$

Pentru valorile de lucru ale rezistenţelor de intrare şi pentru numărul obişnuit de intrări ale unui amplificator suma $\sum \frac{R_r}{R_i}$ nu depăşeşte valoarea 10^2.

Cunoscînd că pentru amplificatorii maşinii MECAN-1 $K \cong 10^8$, rezultă eroarea relativă

$$\frac{U_e' - U_e}{U_e} = \frac{1}{K}\left(1 + \sum \frac{R_r}{R_i}\right) \cong 10^{-6}.$$

De unde se observă că eroarea introdusă de coeficientul finit de amplificare este cu totul neglijabilă. A doua sursă de erori rezidă în imprecizia cu care se modelează coeficienţii a_{ij} şi b_i din ecuaţia (7). Astfel în locul valorilor exacte a_{ij} şi b_i se lucrează cu

$$\begin{aligned} a_{ij}' &= a_{ij} + \Delta a_{ij}, \\ b_i' &= b_i + \Delta b_i. \end{aligned} \tag{14}$$

Deci în loc de sistemul (8) se rezolvă sistemul (15):

$$\|A'\| \cdot \|X'\| = \|b'\|, \tag{15}$$

sau

$$\|X'\| = \|A'\|^{-1} \cdot \|b'\| = \frac{1}{A'} \begin{Vmatrix} A_{11}' & A_{12}' & \cdots & A_{1n}' \\ A_{21}' & A_{22}' & \cdots & A_{2n}' \\ \vdots & & & \\ A_{n1}' & \cdots\cdots & & A_{nn}' \end{Vmatrix} \cdot \|b'\|, \tag{16}$$

unde A' — reprezintă valoarea determinantului matricii pătratice $\|A''\|$,
A_{ij}' — minorii principali ai acestui determinant.

Însă,

$$A' = \sum \pm a_{1k_1}' \cdot a_{2k_2}' \cdot a_{3k_3}' \cdots a_{nk_n}', \tag{17}$$

pentru cele $n!$ permutări ale indicilor k_i. Înlocuind în (17) pe a_{ij}' cu expresia sa din (14) şi neglijînd toţi termenii care conţin produse ale erorilor Δa_{ij} se obţine

$$A' = A + \sum_{i,j} \Delta a_{ij} \sum \pm a_{1j_1} \cdot a_{2j_2} \cdots a_{i-1 \cdot j_{i-1}} \cdot a_{i+1 \cdot j_{i+1}} \cdots a_{nj} = A + \sum \Delta a_{ij} \cdot A_{ij}'.$$

Punînd de asemenea minorii A_{ij}' sub forma

$$A_{ij}' = A_{ij} + \Delta A_{ij} \tag{18}$$

și înlocuind în (16) pe A', A'_{ij} și b'_i cu expresiile lor date mai sus, relația (16) devine

$$\|X'\| = \frac{1}{1+\sum_{i,j}\frac{A_{ij}}{A}\Delta a_{ij}}\left(\|X\| + \frac{1}{A}\|A_{ij}\|\cdot\|\Delta b\| + \frac{1}{A}\|\Delta A_{ij}\|\cdot\|b\|\right). \tag{19}$$

Pentru componenta x'_i a necunoscutelor rezultă:

$$x'_i = \frac{1}{1+\sum_{i,j}\frac{A_{ij}}{A}\Delta a_{ij}}\left(x_i + \frac{1}{A}\sum_{j=1}^{n} A_{ij}\,\Delta b_j + \frac{1}{A}\sum_{j=1}^{n}\Delta\, A_{ij}\, b_j\right). \tag{20}$$

Eroarea de determinare a determinantului A este

$$S_1 = \sum_{i,j=1}^{n}\sum\frac{A_{ij}}{A}\Delta a_{ij}. \tag{21}$$

Coeficienții $\frac{A_{ij}}{A}$ reprezintă soluțiile sistemului de ecuații a cărui matrice a coeficienților este $\|A\|$ iar matricea termenilor liberi are un singur termen nenul, egal cu unitatea pe linia j. Ordinul de mărime al acestor coeficienți poate fi deci determinat cu ușurință pe mașina analogică, după programarea sistemului de ecuații studiat. Dacă media pătratică a acestor coeficienți este H, media pătratică a sumei S_1 va fi

$$\sigma_1 = n\,H\,\sigma_a, \quad \text{unde } \sigma_a = \sqrt{M\{\Delta a_{ik}^2\}}. \tag{22}$$

În mod analog, pentru suma S_2 se obține media pătratică

$$S_2 = \sum_{j=1}^{n}\frac{|A_{ij}|}{|A|}\Delta b_j \tag{23}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{n}\,H\sigma_b,$$

unde

$$\sigma_b = \sqrt{M\{\Delta g^2\}}. \tag{24}$$

Suma S_3 se poate dezvolta în felul următor:

$$S_3 = \sum_{j=1}^{n}\frac{\Delta A_{ij}}{A}b_j = \sum_{j=1}^{n}\left[\frac{A_{ij}}{A}\sum_{\substack{l=j\\ l\neq i}}^{n}\sum_{\substack{m=1\\ m\neq j}}^{n}\frac{A'_{lm}}{A_{ij}}\Delta a_{lm}\right]b_j. \tag{25}$$

Coeficienții $\frac{A_{lm}}{A_{ij}}$ sînt soluțiile sistemului de ecuații avînd matricea coeficienților $\|A_{ij}\|$ și un singur termen liber nenul, egal cu unitatea. Fie H', media pătratică a acestor coeficienți și b media pătratică a termenilor matricei $\|b\|$; σ_3 rezultă:

$$\sigma_3 = \sqrt{n}\,(n-1)\,H\,H'\,b\,\sigma_a. \tag{26}$$

Dacă $S_1 \ll 1$; $S_2 \ll x_i$; $S_3 \ll x_i$,

expresia x'_i poate fi aproximată prin expresia liniară obținută prin dezvoltare în serie Taylor

$$x'_i = x_i - S_1 x_i + S_2 + S_3. \tag{27}$$

Presupunînd că S_1, S_2 şi S_3 sînt mărimi statistice independente, rezultă abaterea medie pătratică a mărimii x_i'

$$\sigma_{x_i'} = \sqrt{M\{(x_i' - x_i)^2\}} = \sqrt{x_i^2\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}. \tag{28}$$

Pentru o lege dată de repartiţie a erorilor aceeaşi pentru Δa_{ik} şi Δb_k eroarea probabilă relativă de determinare a uneia din aceste mărimi z, este

$$\varepsilon_a = \frac{K\sigma_z}{Z}. \tag{29}$$

Considerînd că erorile relative au fost raportate la mediile pătratice a şi b, ale valorilor considerate pentru a_{ij} şi b_i, rezultă

$$e_x = \sqrt{n^2 H^2 a^2 \varepsilon_a^2 x_i^2 + n H^2 b^2 \varepsilon_b^2 + n(n-1) H^2 H'^2 b^2 a^2 \varepsilon_a^2}. \tag{30}$$

În cazul termenilor cu coeficienţi a_{ij} pozitivi, eroarea relativă ε_a este egală cu eroarea relativă de reglare a rezistenţelor. În cazul coeficienţilor negativi, utilizarea unui inversor introduce două rezistenţe suplimentare, teoretic egale.

Dacă valorile teoretice ale rezistenţelor sînt

$$r_{ij} = \frac{K}{a_{ij}}, \quad R_1 = R_2,$$

iar valorile reale

$$r_{ij}' = r_{ij} + \Delta r_{ij}; \; R_1' = R_1 + \Delta R_1; \; R_2' = R_2 + \Delta R_2,$$

rezultă că în locul valorii exacte a_{ij} intervine în ecuaţie coeficientul

$$a_{ij}' = a_{ij} + \Delta a_{ij} = \frac{K R_2'}{r_{ij} R_1'}.$$

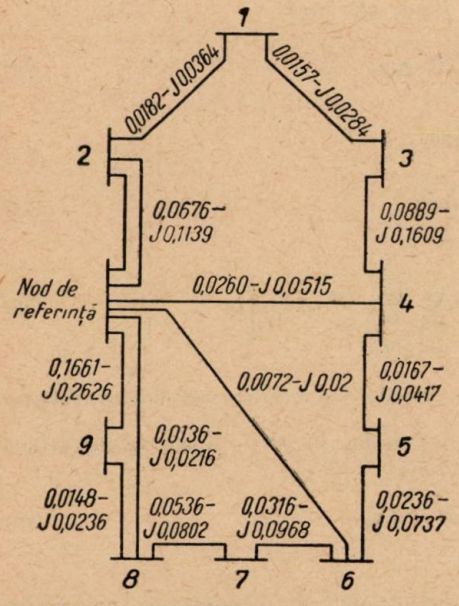


Fig. 3. — Schema reţelei pentru care s-a calculat matricea impedanţelor de transfer.

În ipoteza că abaterile relative pentru R_2, R_1 şi r_{ij} au aceeaşi medie pătratică ε_r, rezultă

$$\sqrt{M\left\{\left(\frac{\Delta a_{ij}}{a_{ij}}\right)^2\right\}} = \sqrt{3}\,\varepsilon_r.$$

Eroarea relativă probabilă fiind proporţională cu abaterea medie pătratică, înseamnă că eroarea probabilă relativă este de $\sqrt{3}$ ori mai mare pentru coeficienţii negativi decît pentru cei pozitivi. În paragraful următor, este dată estimarea pe baza unui exemplu a erorilor datorite impreciziei de reglare a rezistenţelor de lucru.

3. Ca exemplificare, s-a căutat să se obţină matricea $\|Z\|$ a reţelei din figura 3 [2], cu ajutorul maşinii electronice de tip analogic MECAN-1 a Institutului de energetică al Academiei R.P.R.

Din matricea admitanţelor s-a obţinut mai întîi matricea $\|B^2 + G^2\|$; (vezi tabela 1).

Tabela 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	8 057,5	−10 008,18	−9 390,89	5 965,29					
2	−10 008,18	31 607,93	1 319,5						
3	− 9 390,89	1 319,5	81 620,72	−92 341,24	8 194,16				
4	5 965,29		−92 341,24	117 695,17	−18 278,88	3 467,41			
5			8 194,16	−18 278,88	22 947,68	−25 083,82	8 012,58		
6				3 467,41	−25 083,82	57 491,93	−41 231,36	9 601,48	
7					8 012,58	−41 231,36	59 254	−33 358,76	2 686
8						9 601,48	−33 358,76	32 530,16	−13 604,68
9							2 686,−	−13 604,68	115 411,25

Pentru calculul unei coloane a matricei $\|Z\|$ este necesar să se rezolve un sistem de 9 ecuaţii cu nouă necunoscute de forma :

$$\sum_{j=1}^{9} a_{ij}\, x_j - b_i = 0, \quad \text{pentru } i = 1, 2, \ldots 9,$$

unde a_{ij} reprezintă termenul după coloana j linia i a matricei $\|G^2 + B^2\|$; b_i reprezintă termenul după coloana k linia i a matricei $\|Y_t\|$ şi x_j reprezintă termenul după coloana k linia j a matricei impedanţelor de transfer.

Pentru rezolvare pe maşina analogică s-au încercat toate metodele directe prezentate în capitolul anterior. Numai metoda de rezolvare cu ajutorul ecuaţiilor diferenţiale a dat satisfacţie.

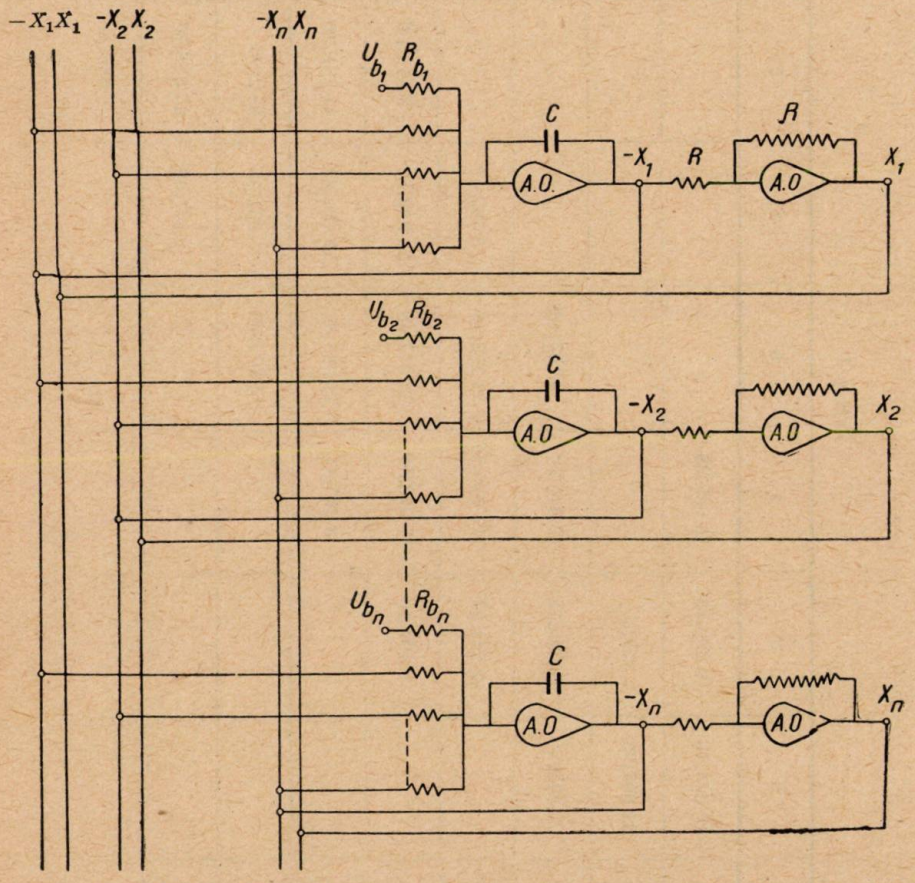


Fig. 4. — Schema de conexiune a amplificatoarelor operaţionale la utilizarea metodei de rezolvare cu ajutorul ecuaţiilor diferenţiale.

S-au găsit soluţiile pentru sistemul de mai sus rezolvînd un sistem de ecuaţii diferenţiale de forma :

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^{9} a_{ij}\, x_j - b_i \quad \text{pentru } i = 1, 2, \ldots 9,$$

utilizînd următoarea schemă de lucru (fig. 4).

Se observă, ca pentru rezolvarea unui sistem cu n necunoscute trebuie $2n$ amplificatori operaționali și $n(n+1)$ rezistențe.

Programarea s-a făcut în felul următor:

s-a ales tensiunea care modelează variabila x_j de forma

$$U_j = K_U \cdot x_j$$

și rezistența de intrare

$$R_{ij} = \frac{K_R}{a_{ij}},$$

rezultă

$$\frac{U_{bi}}{R_{bi}} = -b_i \frac{K_U}{K_R}.$$

S-au ales astfel K_U și K_R ca tensiunile și rezistențele să fie în limitele admisibile.

În tabela 2, se dau rezultatele obținute pentru o coloană a matricei impedanțelor calculate cu mașina analogică (x'). Pentru comparație se dau soluțiile obținute pentru același exemplu rezolvat pe mașina electronică cifrică (CIFA-3) (x).

Tabela 2

j	x'_j	x_j	$x'_j - x_j$
1	8,72	8,843	0,123
2	2,064	2,094	0,03
3	2,9	3,1	0,2
4	1,89	2,15	0,26
5	0,945	1,17	0,225
6	0,52	0,663	0,143
7	0,356	0,455	0,1
8	0,23	0,271	0,041
9	0,000	0,001	0,001

Aplicînd expresia dedusă pentru eroarea probabilă, la acest caz, și admițînd

$$\varepsilon_a = \varepsilon_b = 5.10^{-3},$$

rezultă:

$$e_x \approx \sqrt{10^{-2} x_i^2 + 2.10^{-4} + 5.10^{-2}}.$$

S-a calculat

$$H \approx H' \approx 10^{-4}; \; a \approx 2{,}10^4; \; b \approx 10^4.$$

Se observă că erorile probabile au același ordin de mărime cu erorile obținute la calculul cu mașina analogică.

4. Pe baza calculelor efectuate se pot trage următoarele concluzii:

a) Mașinile electronice de calcul de tip analogic pot fi utilizate la calculul impedanțelor de transfer ale rețelelor electrice;

b) Utilizînd metode de reducere a ordinului sistemului de ecuații propus la punctul 1, pe o mașină analogică cu n amplificatori operaționali se poate calcula matricea impedanțelor de transfer pentru un sistem energetic cu maximum $\frac{n}{2}$ noduri;

c) Metoda de rezolvare cu ajutorul ecuațiilor diferențiale poate fi aplicată cu succes la aceste probleme.

BIBLIOGRAFIE

1. A. GLIMM, R. HABERMANN, I. M. HENDERSON, L. K. KIRCHMAYER, *Digital calculation of network impedances.* Trans. AIEE, part. **III**, 1285—1295 (1955).
2. A. PETROIANU, *Determinarea circulaţiilor de putere într-o reţea buclată cu ajutorul calculului matricial.* Energetica, *8*, 366—374 (1960).
3. P. GAUSSENS, I. PARDIGON, P. AUGES, J. AUGE, *L'évolution des méthodes de calcul des réseaux maillés liée à l'utilisation des machines.* Bull. Soc. France, Electr., Avril, 1961, 227.
4. М. В. РЫБАШОВ, *Некоторые методы решения линейных алгебраических уравнений на электронных моделях.* Автоматика и телемеханика, *2*, 248—255, 1962.
5. FIFER, *Analogue Computation.* **III**, Mc Graw-Hill, New York, 1961.
6. М. В. РЫБАШОВ, *Решение на модели методом радиента алгебраических уравнений.* Автоматика и телемеханика, (1962).
7. J. TREETZ, *Fehler bei der Lösung linearer algebraischer Gleichungssysteme mit Analogrechnern.* Automatisierung, *4*, 175—181 (1962).
8. I. I. PLĂCINŢEANU, *Teoria erorilor de măsurare şi metoda celor mai mici pătrate.* Ed. tehnică, Bucureşti, 1957.

TRANSFORMATOARE CU CUPRU SAU ALUMINIU?

DE

M. BÎRGĂUANU şi D. CREŢU

621.314.045.1 :621.315.51 + 53

1. INTRODUCERE

În construcţiile electrotehnice se pune de multe ori problema utilizării drept material conductor a cuprului sau a aluminiului. Esenţa problemei constă, pe de o parte, în calităţile electrotehnice superioare ale cuprului şi, pe de altă parte, în accesibilitatea comercială a aluminiului.

Calităţile esenţiale ale cuprului sînt : conductibilitate electrică şi termică bună, rezistenţă mecanică acceptabilă, prelucrabilitate adecvată proceselor tehnologice specifice industriei electrotehnice, contacte electrice uşor de realizat şi durabile în timp între diferitele elemente conductoare de curent şi căldură, uşoară sudabilitate.

Aluminiul prezintă ca avantaje accesibilitatea pe piaţa internă şi mondială, greutate specifică mică şi preţ de cost redus.

Aceste două materiale conductoare prezintă şi o serie de dezavantaje. Astfel cuprul este relativ scump, se găseşte greu pe piaţa materialelor electrotehnice (este un material încă de pe acum deficitar) şi are greutate specifică mare. Aluminiul este, la nivelul tehnologiei actuale, mai puţin prelucrabil în comparaţie cu cuprul şi are rezistivitatea mai mare decît a cuprului. De aici rezultă o serie întreagă de consecinţe pentru construcţia de transformatoare, şi anume, în cazul înfăşurărilor din aluminiu o fereastră mult mai mare şi corespunzător un miez mult mai voluminos, iar în cazul înfăşurărilor de cupru, o secţiune mai redusă de materiale active însă un cost de fabricaţie mai ridicat.

Esenţa prezentului studiu constă în determinarea din punct de vedere economic pentru fiecare situaţie în parte a soluţiilor celor mai bune în ceea ce priveşte alegerea materialului conductor.

La prima vedere s-ar părea că competiţia între aceste materiale conductoare, în construcţia de transformatoare, ar putea decide în favoarea aluminiului sau cuprului în dependenţă de costul de fabricaţie pe de o parte şi pierdere pe altă parte. Se va vedea din cele

ce urmează că din ambele puncte de vedere transformatoarele cu înfăşurări de aluminiu sînt superioare celor cu înfăşurări de cupru.

În prezentul studiu comparativ s-a utilizat o metodă [1] care are în vedere atît costul de fabricaţie cît şi cheltuielile de exploatare.

S-au considerat transformatoare trifazate cu două înfăşurări cu reglaj sub sarcină la 110 kV. Ca exemplu s-au prezentat rezultatele obţinute în studiul transformatorului de 10 MVA pentru care s-au prezentat şi diagramele. Costurile specifice ale materialelor active uzinate respectiv al fierului, cuprului şi aluminiului şi costul de producţie al energiei electrice s-au ales corespunzător situaţiei din ţara noastră adică $m_{Fe} = 13{,}5$ lei/kg, $m_{Cu} = 47{,}00$ lei/kg, $m_{Al} = 39{,}5$ lei/kg şi $m_e = 0{,}15$ lei/kWh.

Inducţia B_a în coloană a fost adoptată de 1,65 T. În ce priveşte metodica şi valorile mărimilor utilizate, trimitem la lucrările [2], [3].

2. STABILIREA PIERDERILOR DE SCURTCIRCUIT ALE TRANSFORMATOARELOR CELOR MAI ECONOMICE

Comparaţia dintre înfăşurarea de cupru şi înfăşurarea de aluminiu se face în cele mai bune condiţii atunci cînd se compară transformatoare de putere egală şi anume cu cost anual total minim.

Conform metodei tehnice economice acest cost minim se stabileşte funcţie de pierderile de scurtcircuit nominale. În figura 1 sînt reprezentate costurile anuale totale ale transformatoarelor)* cu înfăşurare de aluminiu şi cu înfăşurare de cupru pentru diferite valori ale indicelui ε care caracterizează durata de funcţionare anuală la pierderi nominale de scurtcircuit. În prezenta lucrare indicele ε este considerat ca parametru întrucît din studiile anterioare [2], [3] rezultă deosebita importanţă pe care acest indice o are. Figura 1 ilustrează două aspecte principale : 1 — preţul de cost total anual al transformatoarelor cu înfăşurări

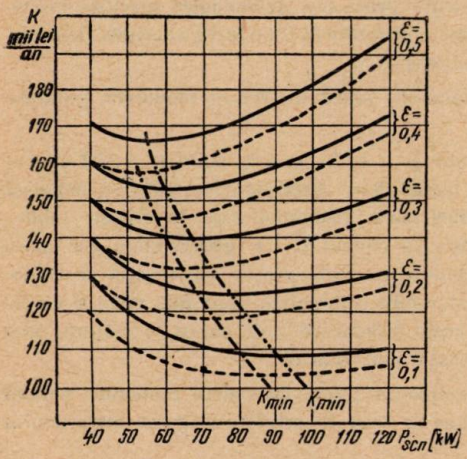


Fig. 1. — Costul total anual al transformatoarelor cu înfăşurare din aluminiu şi cu înfăşurare din cupru, funcţie de pierderile nominale de scurtcircuit pentru diferite valori ale indicelui de utilizare anuală la pierderi maxime — ε. Prin linii întrerupte, cu puncte, s-au trasat locurile geometrice ale valorilor minime ale costurilor totale anuale.

*) În toate figurile curbele privitoare la transformatoarele cu înfăşurare din cupru sînt trasate cu linie plină, iar pentru cele cu aluminiu, cu linie întreruptă.

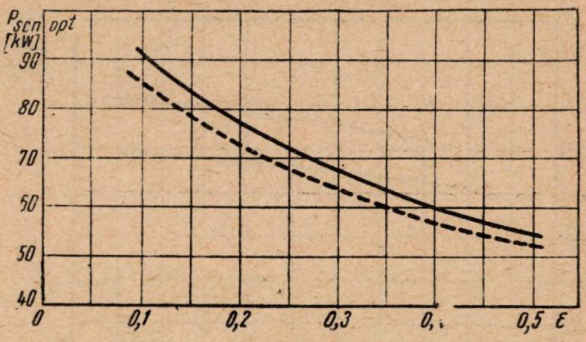


Fig. 2. — Valorile optime ale pierderilor de scurtcircuit nominale funcție de timpul de utilizare la pierderi maxime pentru transformatoare cu înfășurări din cupru și din aluminiu.

de cupru este cu (5—10 %) mai mare decît cel al transformatoarelor cu înfășurări din aluminiu la pierderi de scurtcircuit și grad de încărcare date și 2 — pierderile de scurtcircuit ale transformatoarelor celor mai economice au valori mai mici pentru înfășurări din aluminiu decît pentru înfășurările din cupru cu aproximativ 6 %.

În figura 2 sînt reprezentate pierderile de scurtcircuit nominale pentru transformatoarele optime din punct de vedere economic pentru înfășurări din aluminiu și înfășurări din cupru funcție de indicele ε. O dată cu creșterea lui ε aceste pierderi nominale de scurtcircuit scad mai repede la transformatorul cu cupru decît la cel cu înfășurări din aluminiu.

3. GEOMETRIA TRANSFORMATOARELOR OPTIME CU ÎNFĂȘURĂRI DIN CUPRU ȘI DIN ALUMINIU

Geometria transformatorului se poate caracteriza prin dimensiunile principale D, H și F respectiv, diametrul cilindrului circumscris coloanei, înălțimea și lățimea ferestrei precum și prin rapoartele acestor dimensiuni. Rapoartele $y = \frac{D}{F}$ și $x = \frac{H}{F}$ care caracterizează silueta transformatorului sînt reprezentate pentru cazul concret studiat, în

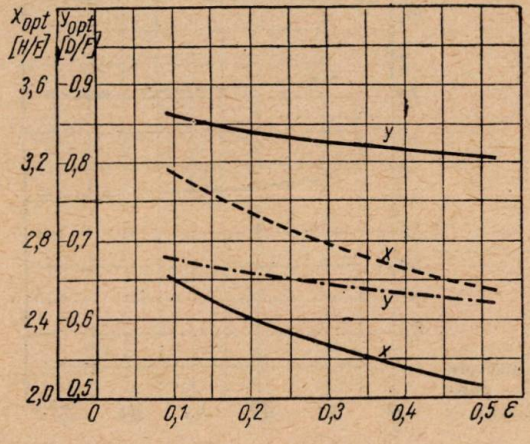


Fig. 3. — Factorii de siluetă $x = H/F$ și $y = D/F$ ai transformatoarelor optime cu înfășurare de cupru și cu înfășurare de aluminiu funcție indicele ε.

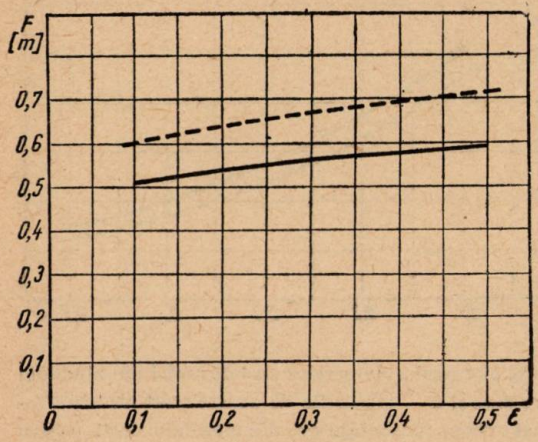


Fig. 4. — Lăţimea ferestrei funcţie de indicele de utilizare anuală la pierderi maxime — ε — pentru transformatoare cu cupru şi cu aluminiu.

figura 3. Raportul x scade o dată cu creşterea lui ε mai mult decît y, în schimb deosebirea dintre transformatorul cu înfăşurare de cupru şi transformatorul cu înfăşurare din aluminiu este mai accentuată în ceea ce priveşte raportul y decît x.

În cazul înfăşurării din aluminiu fereastra circuitului magnetic devine relativ mai înaltă iar miezul mai subţire.

Lăţimea ferestrei, aşa cum rezultă din figura 4, este mai mare în cazul aluminiului decît în cazul cuprului şi creşte o dată cu indicele ε. Astfel la $\varepsilon = 0{,}5$ fereastra transformatorului optim cu înfăşurarea din cupru are o lăţime aproximativ egală cu cea a trasnformatorului cu aluminiu pentru $\varepsilon = 0{,}1$.

În figura 5 s-a reprezentat variaţia înălţimii ferestrei transformatorului cel mai economic funcţie de ε. Atît la aluminiu cît şi la cupru înălţimea ferestrei scade uşor cu creşterea lui ε (variaţii $< 10\,\%$); fereastra transformatorului cu înfăşurare din aluminiu, este sensibil mai înaltă decît cea a transformatorului cu cupru cu $\approx 35\,\%$.

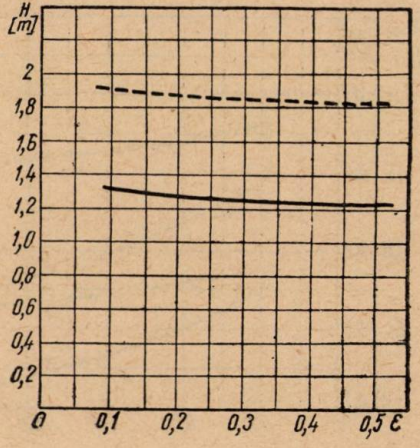


Fig. 5. — Înălţimea ferestrei funcţie de indicele de utilizare anuală la pierderi maxime — ε — pentru transformatoare cu cupru şi cu aluminiu.

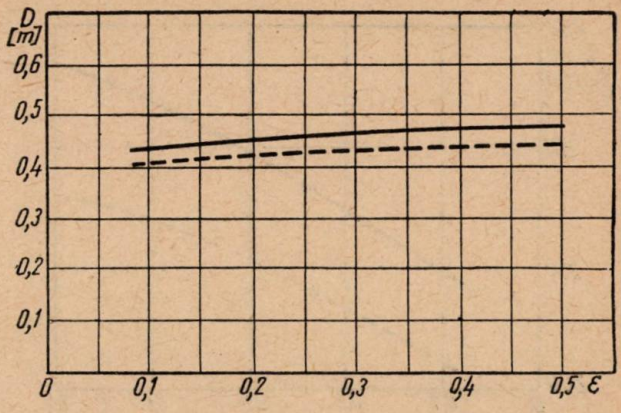


Fig. 6. — Diametrul cilindrului circumscris coloanei funcție de indicele de utilizare anuală la pierderi maxime pentru transformator cu cupru și cu aluminiu.

Diametrul coloanei este și el funcție de ε și crește ușor o dată cu ε. Diferența dintre diametrele coloanei transformatoarelor cu aluminiu și cu cupru este de $\approx 6\,\%$, și anume diametrul în cazul aluminiului rezultă mai mic (vezi fig. 6).

4. COSTUL DE FABRICAȚIE ȘI PIERDERILE DE MERS ÎN GOL

Din punctul de vedere al producătorului de transformatoare prezintă interes cu deosebire costul materialelor active uzinate. În figura 7 s-au prezentat prețurile de fabricație ale transformatoarelor din cupru și aluminiu funcție de pierderile de scurtcircuit iar în figura 8 s-au reprezentat aceleași prețuri pentru transformatorul optim funcție de ε. Ambele reprezentări arată că costul de producție al transformatorului cu înfășurare din cupru este mai mare decît cel din aluminiu cam cu aproximativ 20 % și variază mult cu ε (crește o dată cu acesta).

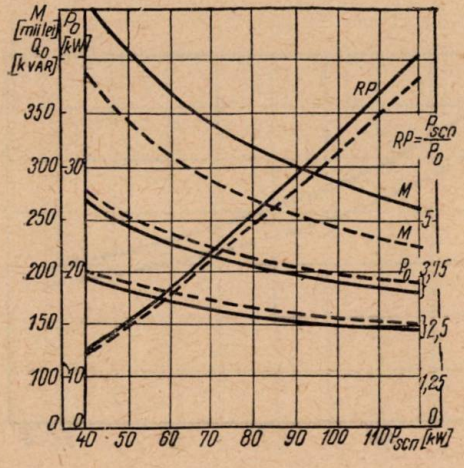


Fig. 7. — Costul de fabricație M, pierderile de mers în gol active P_0 și reactiva Q_0 și raportul pierderilor (RP) nominale de scurtcircuit supra pierderilor de mers în gol, funcție de pierderile de scurtcircuit pentru transformatoare cu înfășurări din cupru și din aluminiu.

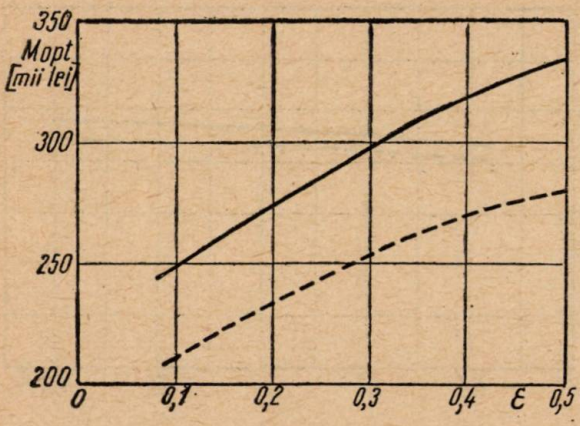


Fig. 8. — Costul de fabricaţie al transformatoarelor cu cupru şi cu aluminiu funcţie de indicele ε.

Pierderile active şi puterea de magnetizare de mers în gol sînt, aşa cum se poate vedea tot pe figura 7, mai mari la transformatorul cu înfăşurare de aluminiu decît la cel cu înfăşurarea de cupru diferenţa între ele fiind de aproximativ 5 %.

În figura 9 s-au reprezentat rapoartele dintre pierderile de scurtcircuit şi pierderile la mers în gol funcţie de — ε. Aceste rapoarte sînt mai mari pentru transformatoarele cu cupru şi mai mici pentru cele cu aluminiu. Pentru transformatorul cel mai economic, la ε = 0,1 acest raport este aproximativ 6 în cazul cuprului şi 5,3 în cazul aluminiului, la ε = 0,5 aceste rapoarte scad la jumătate.

5. COSTUL TOTAL ANUAL ŞI COMPONENTELE LUI

Figura 10 reprezintă componentele costului total anual al transformatoarelor optime. Din analiza acestora se constată:

a) costul anual al materialelor active uzinate K_M este mai mare în cazul înfăşurării cu cupru, el creşte cu ε destul de mult;

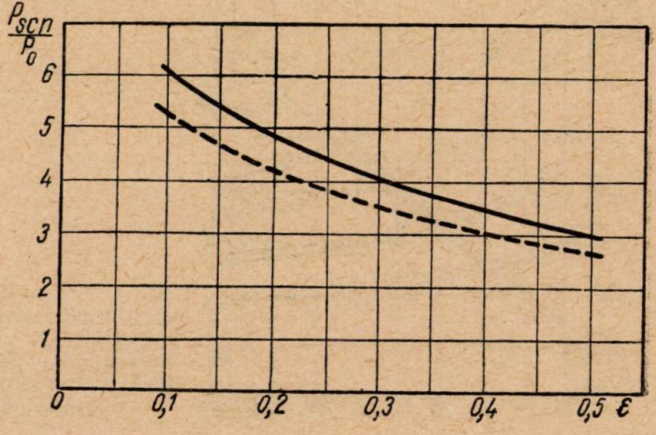


Fig. 9. — Raportul pierderilor de scurtcircuit şi de mers în gol funcţie de indicele ε pentru cupru şi pentru aluminiu.

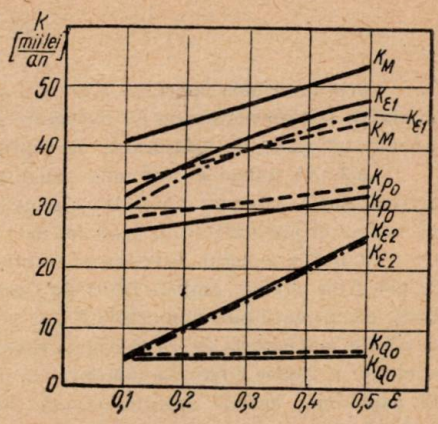


Fig. 10. — Componentele costului total anual: K_M — costul anual al materialelor; K_{P0} — costul anual al pierderilor active de mers în gol; K_{Q0} — costul anual al pierderilor reactive de mers în gol; $K_{P\varepsilon}$ — costul anual al pierderilor active de mers în sarcină; $K_{Q\varepsilon}$ — costul anual al pierderilor reactive de mers în sarcină, funcție de indicele de utilizare anuală la pierderi maxime — ε — pentru transformator cu înfășurare din cupru și din aluminiu.

b) costul anual al pierderilor de mers în gol K_{p0} este mai mare în cazul înfășurării de aluminiu și crește de asemenea cu ε;

c) costul anual al compensării puterii reactive K_{Q0} de mers în gol este practic același în cazul transformatorului cu înfășurare de cupru și practic nu depinde de ε;

d) costul anual al pierderilor de mers în sarcină $K_{P\varepsilon}$ este mai mare în cazul înfășurării din cupru și crește neliniar o dată cu ε;

e) costul anual al compensării puterii reactive la funcționarea în sarcină este sensibil același pentru cazul ambelor materiale conductoare și variază în mare măsură cu ε.

În figura 11 sînt reprezentate costurile anuale totale ale transformatoarelor celor mai economice cu înfășurare din cupru și din aluminiu. Se constată că transformatoarele cu înfășurare de cupru sînt mai scumpe decît cele cu înfășurare de aluminiu pentru orice valoare a lui ε. Diferența dintre costurile anuale totale ale acestor tipuri de transformatoare este de circa 5%.

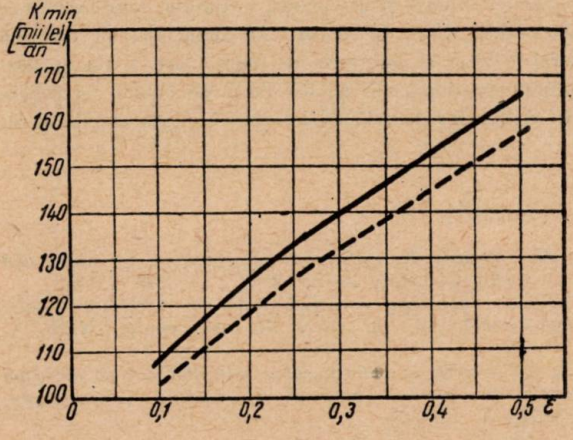


Fig. 11. — Costul anual minim funcție de indicele ε pentru cupru și aluminiu.

6. CONCLUZII

6.1. Principala concluzie a lucrării este că, la preţurile considerate ale cuprului şi aluminiului, transformatoarele cu înfăşurare de aluminiu au un cost total anual mai mic decît transformatoarele ca înfăşurarea de cupru, aşadar sînt mai ieftine.

6.2. Nu numai costul total anual ci şi costul de producere, adică cel al materialelor active uzinate, este mai mic la transformatorul cu înfăşurare de aluminiu. Deci, şi din punctul de vedere al producătorului acest fel de transformator este de preferat.

6.3. Din punctul de vedere al costului pierderilor şi compensării puterii reactive de mers în gol şi în sarcină, ambele feluri de transformatoare se situează cam la acelaşi nivel. Costurile compensării puterii reactive K_{Q0} şi $K_{Q\varepsilon}$ sînt aproape aceleaşi în ambele cazuri, $K_{P\varepsilon}$ este în adevăr mai mare la cupru în schimb costul pierderilor de mers în gol K_{P0} este mai mare la aluminiu şi anume diferenţa exprimată în mii lei pe an este aproximativ aceeaşi. Prin urmare în exploatare ambele transformatoare se comportă asemănător, costul anual al pierderilor fiind aproape acelaşi. Rezultă deci că pentru cazul de perspectivă din ţara noastră şi actual pentru alte ţări unde costul energiei electrice este mult mai mic decît cel adoptat în prezentul studiu, transformatoarele cu înfăşurări din aluminiu rămîn în continuare mai avantajoase.

6.4. Din analiza făcută rezultă că diametrul coloanei este mai mic la aluminiu decît la cupru în schimb înălţimea ferestrei creşte şi creşte de asemenea lăţimea ei. Aşadar, în cazul utilizării aluminiului dimensiunile transformatorului cresc şi miezul devine mai greu. La trasnformatoare de puteri mari va trebui considerată deci şi eventualitatea prohibitivă a depăşirii gabaritului admisibil şi deci renunţarea la avantajul costului total anual mai redus al transformatorului cu înfăşurare de aluminiu.

6.5. Lucrarea de faţă este destinată a aduce contribuţii în comparaţia dintre cele două materiale conductoare folosite la construcţia transformatoarelor. Concluziile sînt riguros valabile numai pentru transformatorul de 10 MVA 110 kV avut în vedere în calculul numeric. Metoda utilizată nu permite deducerea acestor concluzii din relaţii analitice. Se poate însă presupune că concluziile sînt extensibile la o gamă largă de transformatoare întrucît cazul particular avut în vedere se situează în mod privilegiat faţă de proprietăţile cuprului şi aluminiului.

6.6. Alegerea aluminiului ca material conductor mai favorabil pentru înfăşurarea transformatoarelor a fost făcută pe baza calculelor tehnice şi economice şi anume considerîndu-se costul total anual minim pentru ambele cazuri. Afară de costul total anual apar în practică şi alte considerente, ca cel tehnologic, cel privitor la siguranţa de funcţionare. Linia de dezvoltare a tehnicii face, însă, ca poziţia dezavantajoasă din aceste din urmă puncte de vedere să se elimine treptat aşa încît, avînd în vedere şi rezervele de minereu indigen, aluminiul rămîne totuşi cel mai economic.

BIBLIOGRAFIE

1. I. POPOV, *Eine neue Methode zur Bestimmung der optimalen abmessungen der Kerne von Leistungstransformatoren*, Deutsche Elektrotechnik, **12**, 7, 243—248 (1958).
2. D. CREŢU, M. BÎRGĂUANU, P. OPRIŞAN, *Influenţa variaţiei indicilor tehnico-economici asupra soluţiei optime a transformatoarelor de putere*, St. cerc. energ., **XIII**—A, *1* (1963).
3. M. BÎRGĂUANU, D. CREŢU, C. BĂLĂ, *Cu privire la determinarea soluţiilor optime ale unei serii unitare de transformatoare de putere pe bază de considerente tehnice şi economice*, St. cerc. energ., **XIII**—A, *1* (1963).

ANALIZA UNUI SISTEM DE VECTORI POLIFAZAT CU AJUTORUL ABATERILOR DE LA SIMETRIE*)

DE

I. ADĂMUŢ

BIBLIOTECA CENTRALĂ A UNIVERSITĂȚII TEHNICE GHEORGHE ASACHI DIN IAȘI 1848

1. INTRODUCERE

Metodele de analiză ale sistemelor de vectori polifazaţi nesimetrici: metoda componentelor simetrice [1] şi metoda componentelor α, β, 0, [2], [3] utilizează în expresia componentelor toţi vectorii daţi ai sistemului cu valorile lor iniţiale.

În cele ce urmează, se prezintă expresiile componentelor sistemului nesimetric într-o formă nouă, în funcţie de *componentele abatere* a vectorilor daţi faţă de vectorii corespunzători ai unui sistem simetric, avînd ca vector origine vectorul V_1 sau A. Aceste componente se vor denumi în continuare numai *abateri*. Ele au o existenţă fizică uşor sesizabilă, fiind mărimile care contribuie la nesimetria sistemului şi în cazul referirii la rezultantă, mărimile care produc dezechilibrul sistemului.

Evident că sistemul de vectori nesimetric poate fi exprimat şi direct în funcţie de sistemul simetric polifazat $\underline{V}_1$ sau $\underline{A}$ şi de vectorii abatere. Componentele $\underline{V}_1$, $\underline{\Delta}_2 \div \underline{\Delta}_m$, în cazul unui sistem trifazat V_1, Δ_2, Δ_3, iar în cazul cînd se consideră $\underline{V}_1$ ca unitate de măsură, componentele 1, Δ_2^*, Δ_3^*, unde Δ_2^* şi Δ_3^* sînt mărimi relative, adimensionale.

2. DEFINIREA ABATERILOR

2.1. ***Abaterea vector, abaterea modul, abaterea defazare. Relaţii între ele.*** Voi considera vectorul general, V_k, al unui sistem de vectori polifazat cu m vectori (fig. 1). Vectorul simetric de ordinul k faţă de vectorul V_1, luat ca vector de referinţă, va fi V_k'. Mărimile caracteristice ale sistemului simetric V_k' vor fi

$$\left.\begin{aligned} \alpha_m' &= 2\pi/m \\ a_m &= e^{j\alpha_m'} \\ \underline{V}_k' &= V_1\, a_m^{-(k-1)} \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

unde α_m' este faza, iar a_m, operatorul sistemului simetric de vectori.

*) Lucrare prezentată în secţia electroenergetică a Institutului de energetică la 31 ianuarie 1963.

Voi introduce următoarele noțiuni:

$$\left.\begin{aligned} &\text{Abatere modul, } \delta_k: \quad \delta_k = V_k - V_1 \quad (a),\\ &\text{,, defazare, } \varphi_k: \quad \varphi_k = \alpha_k - \alpha'_k \quad (b),\\ &\text{,, vector, } \underline{\Delta}_k: \quad \underline{\Delta}_k = \underline{V}_k - \underline{V}'_k \quad (c). \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

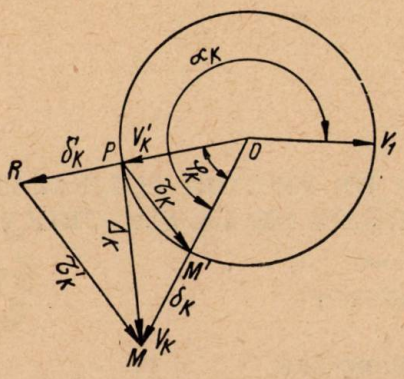


Fig. 1. — Definirea abaterilor.

Primele două sînt mărimi algebrice, putînd avea valori pozitive, negative sau nule, iar a treia este o mărime vectorială, determinată de valorile celor dintîi.

Din figura 1 și relațiile (2) rezultă

$$\underline{V}_k = \underline{V}'_k + \underline{\Delta}_k = \underline{V}'_k + \underline{\tau}_k + \underline{\delta}_k = \underline{V}'_k + \underline{\delta}'_k + \underline{\tau}'_k, \tag{3}$$

$$\underline{\Delta}_k = \underline{\delta}_k + \underline{\tau}_k = \underline{\delta}'_k + \underline{\tau}'_k, \tag{4}$$

unde $\underline{\delta}_k$, $\underline{\delta}'_k$ și $\underline{\tau}_k$, $\underline{\tau}'_k$ sînt vectorii componenți, radiali respectiv de tip tangențial a abaterii vector, $\underline{\Delta}_k$.

Expresia vectorială a abaterii vector, Δ_k se poate exprima analitic în funcție de abaterea modul, abaterea defazare și vectorul V_1, considerînd triunghiurile OPM' și ORM

$$\Delta_k = a_m^{-(k-1)} e^{j\frac{\varphi_k}{2}} \left(\delta_k \cdot e^{j\frac{\varphi_k}{2}} + j\,2V_1 \sin\frac{\varphi_k}{2} \right) = a_m^{-(k-1)} \left[\delta_k + j\,2(\delta_k + V_1)\, e^{j\frac{\varphi_k}{2}} \sin\frac{\varphi_k}{2} \right] =$$

$$= a_m^{-(k-1)} \left[(V_1 + \delta_k)\, e^{j\varphi_k} - 1 \right] \tag{5}$$

2.2. *Expresia abaterii vector în mărimi relative ale abaterii modul.*

Considerînd modulul vectorului V_1 ca mărime de referință voi denumi abatere modul relativă, raportul:

$$\delta_k^* = \frac{\delta_k}{V_1} \tag{6}$$

Domeniul de variație a acestei mărimi este: $-1 \leqslant \delta_k^* < \infty$.

Expresia (5) devine în acest caz:

$$\underline{\Delta}_k = V_1\, a_m^{-(k-1)} \left[\delta_k^* + j\,2(1 + \delta_k^*)\, e^{j\frac{\varphi_k}{2}} \sin\frac{\varphi_k}{2} \right] = V_1\, a_m^{-(k-1)} \left[(1 + \delta_k^*)\, e^{j\varphi_k} - 1 \right] = V_1 \cdot \underline{v}_k \tag{7}$$

Mărimea $\underline{v}_k$ este un vector caracteristic al abaterii $\underline{\Delta}_k$, expresia lui rezultînd din (7), ca funcția de abaterile δ_k^* și φ_k:

$$\underline{v}_k = \frac{1}{V_1}\underline{\Delta}_k = a_m^{-(k-1)}\left[\delta_k^* + j\,2(1+\delta_k^*)\,e^{j\frac{\varphi_k}{2}}\sin\frac{\varphi_k}{2}\right] = a_m^{-(k-1)}\left[(1+\delta_k^*)\,e^{j\varphi_k} - 1\right] \tag{8}$$

Vectorul caracteristic al abaterii se poate exprima și în componentele sale rectangulare înlocuind pe $e^{j\varphi_k}$ și $a_m^{-(k-1)}$ printr-o serie infinită, φ_k fiind exprimat în radiani. Modulul vectorului caracteristic $\underline{v}_k$ rezultă în acest caz din expresia:

$$\underline{v}_k' = (1+\delta_k^*)\,e^{j\varphi_k} - 1 = \delta_k^* + \varphi_k^2(1+\delta_k^*)\left(-\frac{1}{21} + \frac{\varphi_k^2}{41} - \frac{\varphi_k^4}{61} + \dots\right) + \\ + j\,\varphi_k\left(1 - \frac{\varphi_k^2}{31} + \frac{\varphi_k^4}{51}\dots\right) \tag{9}$$

Pentru valori mici ale lui φ_k, numărul de termeni necesari se poate reduce fără erori apreciabile.

3. UTILIZAREA ABATERILOR LA CALCULAREA REZULTANTEI UNUI SISTEM DE VECTORI CONCURENȚI

3.1. *Cazul general* Folosind relația (3) expresia cunoscută a rezultantei unui sistem de vectori polifazat,

$\underline{R}_m = \sum_{k=1}^{m} \underline{V}_k$, devine:

$$\underline{R}_m = \sum_{k=1}^{m}(\underline{V}_k' + \underline{\Delta}_k) = \sum_{k=2}^{m}\underline{\Delta}_k \tag{10}$$

În funcție de abaterile modul și defazare, expresia (10) devine:

$$\underline{R}_m = a_m^{-1}\sum_{k=2}^{m} a_m^{-(k-2)}\left(\delta_k + j\,2V_k\,e^{j\frac{\varphi_k}{2}}\sin\frac{\varphi_k}{2}\right) = a_m^{-1}\sum_{k=2}^{m} a_m^{-(k-2)}\,(\underline{V}_k\,e^{j\varphi_k} - \underline{V}_1) \tag{11}$$

în valori absolute, și

$$\underline{R}_m = V_1\,a_m^{-1}\sum_{k=2}^{m} a_m^{-(k-2)}\left[\delta_k^* + j\,2(1+\delta_k^*)e^{j\frac{\varphi_k}{2}}\sin\frac{\varphi_k}{2}\right] = \\ = V_1\,a_m^{-1}\sum_{k=2}^{m} a_m^{-(k-2)}\,[(1+\delta_k^*)\,e^{j\varphi_k} - 1] = V_1\cdot\underline{v}_m \tag{12}$$

în valori relative.

Analizînd relațiile (10), (11) și (12) se observă următoarele:

a) Rezultanta unui sistem de valori polifazat nesimetric de „m" vectori se poate calcula din însumarea vectorială a „m − 1" vectori abatere,

b) Utilizarea acestei căi poate prezenta interes în toate cazurile în care ar fi necesară cunoașterea gradului de participare la valoarea rezultantei a abaterii fiecărui vector în parte.

c) Calculul rezultantei se simplifică în toate cazurile în care abaterile defazare sînt nule.

d) Calculul rezultantei se poate simplifica la maximum pentru cazul sistemelor de 2, 3 și 4 vectori, tabelînd sau reprezentînd în nomograme vectorul caracteristic v_m, în funcție de abaterile modul relative și abaterile defazare; în acest caz modulul rezultantei se află din înmulțirea lui V_1 cu modulul vectorului caracteristic luat din tabele sau nomograme, iar direcția (unghiul) se ia direct din tabele sau nomogramă.

e) Principiul metodei se bazează pe reducerea elementelor al căror efect este nul: sistemul de vectori polifazat simetric V_1.

3.2. ***Calculul rezultantei unui sistem de doi vectori.*** În fig. 2 se arată construcția grafică a rezultantei pe baza relației (10), cînd $m = 2$.

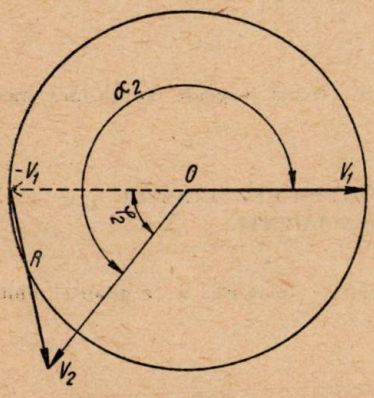


Fig. 2. — Determinarea grafică a rezultantei a doi vectori prin metoda abaterilor.

Expresia vectorului caracteristic în acest caz este:

$$\underline{V}_2 = e^{-j\pi}\left[\delta_2^* + j\,2\,(1+\delta_2^*)\,e^{\frac{j\varphi_2}{2}}\sin\frac{\varphi_2}{2}\right] = e^{-j\pi}\left[(1+\delta_2^*)\,e^{j\varphi_2} - 1\right] \tag{13}$$

Expresia modulului rezultantei se poate scrie și sub forma:

$$R_2 = V_1\sqrt{\delta_2^{*2} + 4\,(1+\delta_2^*)\sin\frac{2\varphi_2}{2}} = V_1\,\underline{v}_2. \tag{14}$$

În tabela 1 sînt indicate valorile vectorului caracteristic V_2, iar în figura 3 este reprezentată variația lui în funcție de abaterile modul relative și de abaterile defazare.

Pentru φ_2 constant, valoarea abaterii modul relativă pentru care este minimă valoarea modulului vectorului caracteristic, V_2 este dată de relația:

$$\delta_2^* = \cos\varphi_2 - 1 \tag{15}$$

Din fig. 3 rezultă că domeniul de variație a modulului vectorului caracteristic v_2 este cuprins într-un dreptunghi deschis spre $\delta_2^* \to \infty$, avînd panta laturilor lungi egală cu 1. Ecuațiile celor trei laturi sînt indicate în tabela 1.

De asemenea mai rezultă că contribuția abaterii modul relativă δ_2^*, este indicată de dreptele $V_2 = -\delta_2^*$ pentru intervalul $-1 \div 0$ variind de la 100% la zero și $V_2 = \delta_2^*$ pentru

intervalul $0 \div \infty$, variind de la zero la 100%, pentru δ_2^* avînd valori foarte mari. Contribuția abaterii defazare variază de la zero pentru $\varphi_2 = 0$ la orice δ_2^* sau $\delta_2^* = -1$ la oricare valoare a lui φ_2, la 100% în cazul cînd $\delta_2^* = 0$. Considerînd un punct oarecare P cuprins

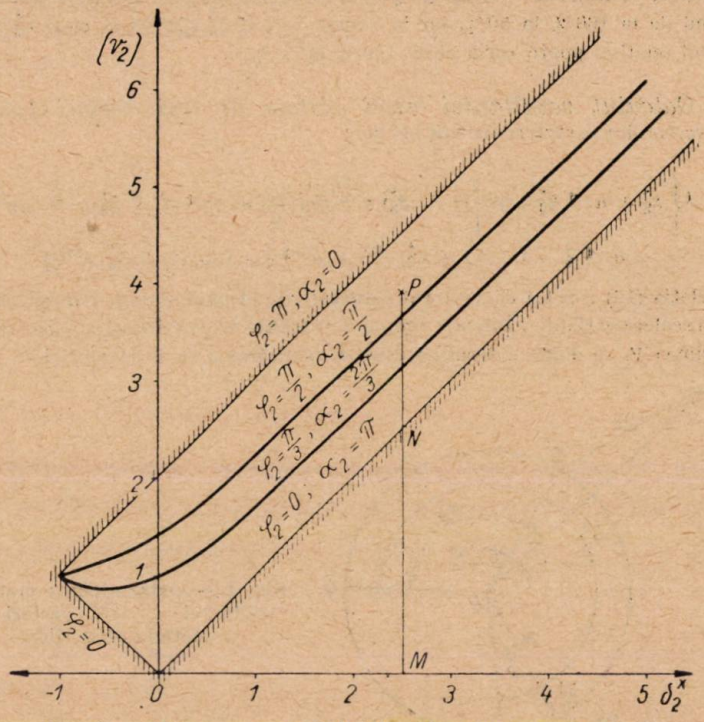


Fig. 3. — Nomograma modulului vectorului caracteristic V_2.

Tabela 1

φ_2	$\nu_2 = \sqrt{\delta_2^{*2} + 4(1+\delta_2^*)\sin^2\frac{h}{2}}$	-1 $-\frac{1}{2}$ 0 $\frac{1}{2}$ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ∞	Valoarea minimă a lui $\lvert\nu_2\rvert$
0	$\nu_2 = \lvert\delta_2^*\rvert$	Variația liniară după dreptele : $\nu_2 = -\delta_2^*$ pt. $-1 \leqslant \delta_2^* \leqslant 0$ și $\nu_2 = \delta_2^*$ pt. $0 \leqslant \delta_2^{*2} \infty$	0 pt. $\delta_2 = 0$
$\pi/3$	$\nu_2 = \sqrt{\delta_2^{*2} + \delta_2^* + 1}$	1 0,87 1 1,32 1,73 2,64 3,60 4,58 5,57 6,56 10,54 ∞	0,87 pt. $\delta_2^* = -\frac{1}{2}$
$\pi/2$	$\nu_2 = \sqrt{(\delta_2^*+1)^2+1}$	1 1,18 1,41 1,8 2,24 3,16 4,13 5,1 6,1 7,07 11	1 pt. $\delta_2^* = -1$
π	$\nu_2 = \delta_2^* + 2$	Variație liniară după dreapta $\nu_2 = \delta_2^* + 2$	În afara domeniului de variație a lui δ_2^*

în domeniul de variație a rezultantei, segmentul MP reprezintă valoarea modulului vectorului caracteristic, segmentul MN, contribuția abaterii modul relativă, iar segmentul NP contribuția abaterii defazare, la valoarea rezultantei.

Se observă că în zona $-0{,}65 \leqslant \delta_2^* \leqslant 2$, influența abaterii defazare poate fi predominantă, variind de la 100% la 50%, iar în zonele $-1 \leqslant \delta_2^* \leqslant 0{,}65$ și $\infty > \delta_2^* \geqslant 2$, influența abaterii modul relativă poate varia de la 100% la 50%.

3.3. ***Calculul rezultantei unui sistem de trei vectori.*** Înlocuind $m = 3$ în expresia vectorului caracteristic voi obține:

$$V_3 = a^{-1}\left\{\delta_2^* + a^{-1}\delta_3^* + j2\left[(1+\delta_2^*)\,e^{j\frac{\varphi_2}{2}}\sin\frac{\varphi_2}{2} + a^{-1}(1+\delta_3^*)\,e^{j\frac{\varphi_3}{2}}\sin\frac{\varphi_3}{2}\right]\right\} = \tag{16}$$
$$= a^{-1}\{-1 + (1+\delta_2^*)\,e^{j\varphi_2} + a^{-1}[-1 + (1+\delta_3^*)\,e^{j\varphi_3}]\}$$

Din relația (16) rezultă că vectorul caracteristic al unui sistem trifazat este funcție de patru mărimi scalare variabile. Întrucît cîmpul de variație a două din aceste mărimi este limitat $0 \div 2\pi$, mărimea V_3 se poate determina dintr-o nomogramă cu 5 parametri.

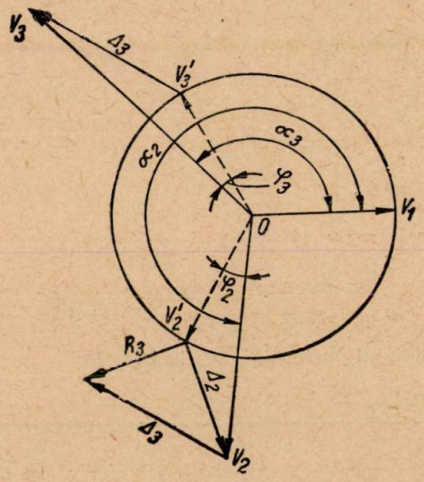


Fig. 4. — Determinarea grafică a rezultantei a trei vectori prin metoda abaterilor.

În fig. 4 am determinat grafic rezultanta sistemului de vectori folosind o construcție geometrică simplă cu rigle, compas și echer. Semnificația simbolurilor utilizate este dată la pct. 2.1.

4. UTILIZAREA ABATERILOR PENTRU ANALIZA UNUI SISTEM TRIFAZAT NESIMETRIC

4.1. *Eprimarea vectorilor sistemului trifazat în funcție de abateri*

Vectorii unui sistem trifazat nesimetric (fig. 4) se pot exprima prin relațiile

$$\underline{V}_1 = \underline{V}_1 \tag{a}$$

$$\underline{V}_2 = a^{-1}\,V_1 + \underline{\Delta}_2 = V_1\,a^{-1}\left[1 + \delta_2^* + j2\,(1+\delta_2^*)\,e^{j\frac{\varphi_2}{2}}\sin\frac{\varphi_2}{2}\right] = V_1\,a^{-1}(1+\delta_2^*)\,e^{j\varphi_2} \tag{b}$$

$$\underline{V}_3 = a^{-2}\,V_1 + \underline{\Delta}_3 = V_1\,a^{-2}\left[1 + \delta_3^* + j2\,(1+\delta_3^*)\,e^{j\frac{\varphi_3}{2}}\sin\frac{\varphi_3}{2}\right] = V_1\,a^{-2}(1+\delta_3^*)\,e^{j\varphi_3} \tag{c}$$

Componentele Δ_2 și Δ_3 sînt elemente care fac necesare dimensionarea corespunzătoare a conductorului neutru în cazul unui sistem de curenți trifazat nesimetric de joasă tensiune.

Sistemul de vectori trifazat nesimetric se descompune deci într-un sistem trifazat simetric V_1 și doi vectori singulari Δ_2 și Δ_3, abaterile vector de la simetrie.

4.2. ***Relații între componentele simetrice și abateri.*** Componentele simetrice utilizate la analiza unui sistem trifazat nesimetric se calculează analitic și grafic [1], [2] utilizîndu-se în ambele metode valoarea inițială a vectorilor dați cu ajutorul abaterilor poate simplifica deducerea lor. Calculul cu ajutorul vectorilor caracteristici V_{3d}, V_{3i} și V_{30}, corespunzători componentelor directă, inversă și homopolară, obținuți direct din tabele sau nomograme ar putea simplifica aflarea componentelor în toate cazurile; în unele cazuri particulare se pot deduce și direct cu ajutorul abaterilor.

Relațiile (18) exprimă componentele simetrice în funcție de abaterile vector, Δ_2 și Δ_3, iar în tabela 2 sînt relațiile dintre componentele simetrice și abaterea modul relativă și abaterea defazare.

$$\left.\begin{aligned} \underline{V}_0 &= \frac{\underline{\Delta}_2 + \underline{\Delta}_3}{3} && \text{(a)} \\ \underline{V}_i &= \frac{a\,(a\,\underline{\Delta}_2 + \underline{\Delta}_3)}{3} && \text{(b)} \\ \underline{V}_d &= V_1 + \frac{a\,(\underline{\Delta}_2 + a\,\underline{\Delta}_3)}{3} && \text{(c)} \end{aligned}\right\} \quad (18)$$

Se observă că componentele simetrice homopolară și inversă sînt funcție numai de abaterile vector Δ_2 și Δ_3 în timp ce componenta simetrică directă este egală cu vectorul de referință V_1 plus un adaos datorit abaterilor.

4.3. ***Determinarea componentelor simetrice cu ajutorul abaterilor într-un caz particular.*** În cazul cînd abaterile defazare sînt nule, $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$ valorile componentelor simetrice sînt (tabela 2).

$$\underline{V}_0 = \frac{V_1}{3}\, a^{-1}\,(\delta_2^* + a^{-1}\,\delta_3) \quad \text{(a)}$$

$$\underline{V}_i = \frac{V_1}{3}\, a\,(\delta_2^* + a\,\delta_3^*) \qquad \text{(b)} \qquad (19)$$

$$\underline{V}_d = \frac{V_1}{3}\,(3 + \delta_2^* + \delta_3^*) \qquad \text{(c)}$$

Relațiile (19) sînt reprezentate în fig. 5. Se observă că componenta homopolară V_0, rezultă ca a treia latură a triunghiurilor cu laturile δ_2^*, δ_3^* și V_0 și punctul M vîrf fix, construite pe dreapta MV_2 și pe familia de drepte D_3 paralele cu V_3. Componenta inversă V_1, se de-

Tabela 2

Expresiile componentelor simetrice în funcţie de abateri în toate situaţiile posibile

Nr. crt.	δ_2^*	δ_3^*	φ_2	φ_3	V_o (componenta homopolară a vectorului caracteristic al sistemului)	V_i (componenta inversă a vectorului caracteristic al sistemului)	V_d (componenta directă a vectorului caracteristic al sistemului	Nr. parametri
1	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$a^{-1}\{(1+\delta_2^*)e^{j\varphi_2}-1+ +a^{-1}[(1+\delta_3^*)e^{j\varphi_3}-1]\}$	$a\{(1+\delta_2^*)e^{j\varphi_2}-1+ a[(1+\delta_3^*)e^{j\varphi_3}-1]\}$	$1+(1+\delta_2^*)e^{j\varphi_2}+(1+\delta_3^*)e^{j\varphi_3}$	4
2	$=0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$a^{-1}\{e^{j\varphi_2}-1+ +a^{-1}[(1+\delta_3^*)e^{j\varphi_3}-1]\}$	$a\{e^{j\varphi_2}-1+ +a[(1+\delta_3^*)e^{j\varphi_3}-1]\}$	$1+e^{j\varphi_2}+(1+\delta_3^*)e^{j\varphi_3}$	3
3	$\neq 0$	$=0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$a^{-1}[(1+\delta_2^*)e^{j\varphi_2}-1+ +a^{-1}(e^{j\varphi_3}-1)]$	$a[(1+\delta_2^*)e^{j\varphi_2}-1+ +a(e^{j\varphi_3}-1)]$	$1+(1+\delta_2^*)e^{j\varphi_2}+e^{j\varphi_3}$	3
4	$\neq 0$	$\neq 0$	$=0$	$\neq 0$	$a^{-1}\{\delta_2^*+a^{-1}[(1+\delta_3^*)e^{j\varphi_3}-1]\}$	$a\{\delta_2^*+a[(1+\delta_3^*)e^{j\varphi_3}-1]\}$	$2+\delta_2^*+(1+\delta_3^*)e^{j\varphi_3}$	3
5	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$=0$	$a^{-1}[(1+\delta_2^*)e^{j\varphi_2}-1+a^{-1}\delta_3^*]$	$a[(1+\delta_2^*)e^{j\varphi_2}-1+a\delta_3^*]$	$2+(1+\delta_2^*)e^{j\varphi_2}+\delta_3^*$	3
6	$=0$	$=0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$a^{-1}[e^{j\varphi_2}-1+a^{-1}(e^{j\varphi_3}-1)]$	$a[e^{j\varphi_2}-1+a(e^{j\varphi_3}-1)]$	$1+e^{j\varphi_2}+e^{j\varphi_3}$	2
7	$=0$	$\neq 0$	$=0$	$\neq 0$	$a^{-1}[(1+\delta_3^*)e^{j\varphi_3}-1]$	$a^2[(1+\delta_3^*)e^{j\varphi_3}-1]$	$2+(1+\delta_3^*)e^{j\varphi_3}$	2
8	$=0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$=0$	$a^{-1}[e^{j\varphi_2}-1+a^{-1}\delta_3^*)$	$a(e^{j\varphi_2}-1+a\delta_3^*)$	$2+e^{j\varphi_2}+\delta_3^*$	2
9	$\neq 0$	$=0$	$=0$	$\neq 0$	$a^{-1}[\delta_2^*+a^{-1}(e^{j\varphi_3}-1)]$	$a[\delta_2^*+a(e^{j\varphi_3}-1)]$	$2+\delta_2^*+e^{j\varphi_3}$	2
10	$\neq 0$	$=0$	$\neq 0$	$=0$	$a^{-1}[(1+\delta_2^*)e^{j\varphi_2}-1]$	$a[(1+\delta_2^*)e^{j\varphi_2}-1]$	$2+(1+\delta_2^*)e^{j\varphi_2}$	2
11	$\neq 0$	$\neq 0$	$=0$	$=0$	$a^{-1}(\delta_2^*+a^{-1}\delta_3^*)$	$a(\delta_2^*+a\delta_3^*)$	$3+\delta_2^*+\delta_3^*$	2

termină ca a treia latură a unui triunghi avînd ca laturi δ_2^* pe direcția lui V_3^* și δ_2^* pe fascicolul de drepte D_2, paralele cu V_2 și punctul M fix. Componenta directă rezultă ca o sumă algebrică pe axa reală.

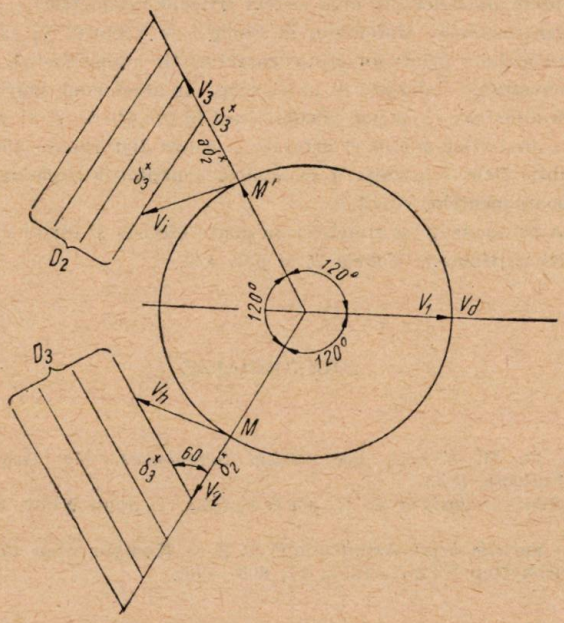


Fig. 5. — Determinarea grafică a componentelor simetrice pentru cazul $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$ (abateri defazare nule).

4.4. Relații între componentele α, β. 0 și abateri Înlocuind în expresiile componentelor α, β, 0 valoarea vectorilor V_1, V_2, V_3 din relațiile (17) voi obține:

$$\underline{V}_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(\underline{V}_1 + \underline{V}_2 + \underline{V}_3) = \frac{1}{\sqrt{3}}(\underline{\Delta}_2 + \underline{\Delta}_3) \qquad \text{(a)}$$

$$\underline{V}_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}}\,\underline{V}_2 - \frac{1}{\sqrt{6}}(\underline{V}_2 - \underline{V}_3) = \sqrt{\frac{3}{2}}\,V_1 + \frac{\Delta_2 + \Delta_3}{\sqrt{6}} \qquad \text{(b)} \qquad (20)$$

$$\underline{V}_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(V_2 - V_3) = \frac{1}{\sqrt{2}}(-V_1\sqrt{3}\,j + \Delta_2 - \Delta_3) \qquad \text{(c)}$$

În cazul componentelor α, β, 0, numai componenta „0" nu conține vectorul V_1.

5. CONCLUZII

1. În lucrare s-au prezentat aspectele teoretice ale mărimilor: abatere vector, abatere modul relativă și abatere defazare, cu ajutorul cărora se poate analiza un sistem de vectori polifazat nesimetric. S-au dat și cîteva exemple din utilizările posibile.

2. Aceste mărimi caracteristice nesimetrice, pot fi folosite ca metodă de calcul pentru determinarea :

— rezultantei unui sistem de vectori concurenți,

— componentele simetrice ale unui sistem trifazat nesimetric.

3. Exprimarea vectorilor sistemului în funcție de vectorul V_1 exprimarea rezultantei și a componentelor simetrice printr-un vector caracteristic adimensional, care se poate obține din tabele sau nomograme elaborate în acest scop. În acest mod mărimile căutate — rezultantă și componente simetrice — se pot calcula direct în funcție de V_1 și vectorul caracteristic.

4. Utilizarea abaterilor modul și defazare — cauze disturbante ale echilibrului și a simetriei ușor sezisabile fizic — permite a se analiza contribuția fiecăreia din ele în valoarea rezultantei sau a componentelor simetrice.

5. Calcularea componentelor simetrice se poate efectua și direct cu ajutorul abaterilor în mai multe cazuri particulare (Tabela 2) și pct. 4.3.

BIBLIOGRAFIE

1. F. C. WAGNER, D. R. EVANS, *Symmetrical components.* Mc Graw Hill, New York and London, 1933.
2. E. CLARKE, *Circuit analysis of A. C. power systems.* I. John Wiley G. S., New York, 1950.
3. H. EDELMANN, *Vorteile beim Arbeiten mit* α, β, 0 Komponenten und deren wichtige Eigenschaften ETZ-A, 1957, 17, 600—606.

ЯНУШ Б. ДАНИЛЕВИЧ, ЮРИЙ А. КУЛИК, *Теория и расчет демпферных обмоток синхронных машин* (Teoria şi calculul înfăşurărilor amortizoare ale maşinii sincrone). Изд. Акад. наук СССР, Москва-Ленинград, 1962, 138 p.

Maşinile sincrone cu polii ieşiţi se prevăd cu piese polare masive sau se echipează în mod uzual cu înfăşurări amortizoare, îndeosebi cînd polii inductivi ai maşinii sînt lamelaţi. Înfăşurarea amortizoare se execută din bare conductoare din cupru sau alamă dispuse în crestăturile prevăzute în piesele polare şi scurtcircuitate frontal prin inele sau prin segmente de inele. Constructiv, înfăşurarea amortizoare se aseamănă cu înfăşurarea în colivie a motoarelor asincrone; particularităţile înfăşurărilor amortizoare constau în următoarele: — în spaţiul dintre piesele polare nu se prevăd bare şi înfăşurarea nu se execută prin urmare din bare repartizate uniform; — barele dispuse în aceeaşi piesă polară pot să fie de asemenea repartizate neuniform, pot avea secţiuni diferite sau pot fi executate chiar din materiale conductoare diferite.

Înfăşurările de amortizare intervin în funcţionarea maşinii cînd se produc cîmpuri magnetice variabile în maşină în raport cu înfăşurarea amortizoare; în asemenea regimuri în înfăşurarea amortizoare se induc tensiuni electromotoare şi apar curenţi prin această înfăşurare. Înfăşurarea amortizoare intervine la funcţionarea maşinii în regim asincron (la pornire, la ieşirea din sincronism), la funcţionarea în scurtcircuit (în regim tranzitoriu, la scurtcircuite nesimetrice), la funcţionarea maşinii în regim oscilant (cînd rotorul are oscilaţii libere sau forţate în raport cu cîmpul învîrtitor al indusului), la variaţii ale cîmpului magnetic inductor (la reglajul excitaţiei, la forţarea excitaţiei etc.).

Comportarea înfăşurării amortizoare este favorabilă în majoritatea regimurilor de funcţionare în care intervine; dimensionarea acestei înfăşurări este funcţie de rolul principal destinat acestei înfăşurări, de datele nominale ale maşinii şi de condiţiile de funcţionare. Numeroasele lucrări apărute în perioada 1920—1960 au adus contribuţii remarcabile la teoria, funcţionarea, construcţia şi calculul înfăşurării amortizoare a maşinilor sincrone. Problema a fost studiată suficient de amănunţit pentru ipotezele simplificatoare admise: neglijarea pierderilor de histerezis şi neglijarea tensiunii magnetice din miezul feromagnetic.

Astfel au fost elaborate lucrări monografice în care se aduc noi contribuţii, dintre cele mai recente sînt următoarele: M. E. Taalat: *A new approach to the calculation of synchronous machine reactances*, T.A.I.E.E, **74** (1955), III, p. 176—183; **75** (1956), III, p. 317; I. I. Talalov: *Opredelenie tokov usnokoitelnîx obmotok iavnopoliusnnîh sinhronnîh maşin*, Gosenergoizdat 1958; A. Nicolaide: *Studiul parametrilor amortizoarelor maşinilor sincrone* (teză de dizertaţie, Inst. politehnic, Bucureşti, 1962).

Lucrarea elaborată de I. B. Danilevici și I. A. Kulik aduce noi contribuții de seamă în problema înfășurării amortizoare a mașinilor sincrone cu polii ieșiți. Lucrarea cuprinde 138 pag., 34 fig., 18 tabele și 62 titluri bibliografice — și este expusă în 12 capitole, fiind însoțită de o aplicație numerică în care este dat un exemplu de calcul pentru o înfășurare de pornire în asincron a unui motor sincron avînd o putere nominală 3300 kW și turația nominală 1 000 rot/min.

Primele 5 capitole tratează despre teoria înfășurării amortizoare, în următoarele 6 capitole se examinează funcționarea înfășurării de amortizare în diferite regimuri, iar în ultimul se dau indicații despre alegerea înfășurării amortizoare.

În capitolul 1 — *Ecuațiile legăturilor transformatorice ale mașinilor sincrone cu înfășurare amortizoare* se stabilesc ecuațiile tensiunilor circuitelor amortizoare formate din cîte două bare vecine împreună cu segmentele de inel frontale în raport cu axele de simetrie ale rotorului, introducîndu-se curenții ciclici prin bucla considerată. Ecuațiile tensiunilor circuitelor amortizoare împreună cu ecuațiile tensiunilor celorlalte circuite ale mașinii sincrone formează ecuațiile tensiunilor mașinii.

În capitolul 2 *Inductivități, inductivități mutuale și rezistența circuitelor înfășurării amortizoare și înfășurării de excitație* se calculează parametrii acestor circuite în ipoteza că numărul de crestături pe pol al înfășurării amortizoare este mare și lărgimea întrefierului din zona unui circuit amortizor este constantă și egală cu lărgimea medie a întrefierului din acea zonă. În lucrare se restabilește expresia de calcul și se dau curbe pentru factorul de majorarea rezistenței și micșorarea inductivității de scăpări prin care se ține seama de refularea curentului.

Capitolul 3 se intitulează *Schema echivalentă a mașinii sincrone cu înfășurarea amortizoare;* după ce se stabilesc factori de raportarea curenților și tensiunilor circuitelor înfășurărilor de amortizare și excitație la înfășurarea indusului în ipoteza că fundamentala tensiunii magnetice este aceeași, se exprimă parametrii în unități relative și se scriu ecuațiile mașinii cu noile expresii ale parametrilor circuitelor.

În lucrare se neglijează reactanța de scăpări a inelelor de conexiune, ceea ce este în general admisibil. Raportarea însă a rezistenței inelului de conexiune la rezistența barei prin înmulțirea cu factorul de raportare de la mașina asincronă cu rotorul în colivie, nu poate fi adoptată în general deoarece poate duce la abateri relativ mari (în special la frecvențe mici). Se prezintă apoi schemele echivalente cunoscute ale mașinii sincrone cu înfășurare amortizoare.

În schema pentru axa longitudinală dată de autori se ține seama de t.e.m. indusă în înfășurarea de excitație de fluxul de scăpări al amortizorului, în schimb se neglijează prezența inelului de conexiune.

Schema echivalentă dată pentru axa transversală corespunde cazului cînd inelele de conexiune sînt complete. La înfășurările cu inele segmentate utilizarea schemei este nepotrivită datorită rolului pe care-l au curenții care se închid prin miez de la un pol la altul, în cazul barelor neizolate.

Capitolul 4 tratează *Metode de calculul curenților în înfășurarea amortizoare.* Se prezintă o metodă sistematizată pentru determinarea succesivă a unor coeficienți necesari la calculul repartiției curenților în bare. Concluzia de la pag. 40, prin care se afirmă că pentru frecvențe mari și la o reactanță de scăpări a circuitelor amortizorului mică în comparație cu reactanța mutuală, are loc o distribuție sinusoidală a curenților în bare, este valabilă numai în cazul unui întrefier uniform. Astfel pentru circuitul k (sistemul 3.33) se dă relația

$$X_k\, p \left[\frac{4}{\pi} I_d \cos \beta_k + I_f + I_{\partial k}\right] + \left(R_c + X_c\, p\right)\left(-I_{\partial k-1} + 2\, I_{\partial k} - I_{\partial k+1}\right) = 0.$$

La frecvențe mari (25 ÷ 50 Hz) $R_c \ll X_c$ și relația de mai sus se poate scrie aproximativ astfel:

$$X_k p\left(\frac{4}{\pi} I_d \cos\beta_k + I_f + I_{\partial k}\right) + X_c p\left(-I_{\partial k-1} + 2I_{\partial k} - I_{\partial k+1}\right) = 0.$$

În continuare se presupune $X_c \ll X_k$ și rezultă

$$\frac{4}{\pi} I_d \cos\beta_k + I_f + I_{\partial k} = 0.$$

De fapt dacă rezistența și reactanța barei ar fi foarte mici, s-ar obține curenți în bare foarte mari, iar termenul al 2-lea din partea a 2-a a relației (b) nu are o valoare determinată; pe de altă parte I_d și $I_{\partial k}$ sînt de semne contrarii astfel încît nu se poate afirma că în general de la (b) se ajunge la (c). La frecvențe mici după cum se poate vedea din relația 4.20 (pag. 42) concluzia este și mai aproximativă.

Totuși ipoteza distribuției sinusoidale a curenților aplicată cu atenție poate simplifica de multe ori calculele.

Impedanța echivalentă a mașinii sincrone formează obiectul capitolului 5.

În acest capitol se stabilesc formulele de calcul pentru determinarea impedanțelor asincrone ale mașinii sincrone, aplicîndu-se trei metode.

Prima metodă constă în transfigurarea succesivă din triunghi în stea a legăturilor impedanțelor din schema echivalentă.

A doua metodă constă în rezolvarea rețelei din schema echivalentă calculînd curenții pe rînd.

A treia metodă constă în determinarea impedanței echivalente din egalitatea pierderilor în impedanțele echivalente și impedanțele amortizorului, admițînd o distribuție sinusoidală a curenților în bare. Formulele obținute pe această cale sînt relativ complicate pentru proiectare.

În capitolul 6 *Regimul asincron al mașinii asincrone* se dau rezultatele unor experimentări amănunțite în care s-au determinat curenții de bare și s-au comparat cu valorile obținute din calcul. Se subliniază că în limite largi curenții din bare depind într-o măsură foarte mare de unghiul dintre bare și într-o măsură neglijabilă de forma întrefierului sub pol.

Calculul încălzirii se face admițînd următoarele simplificări:

nu se ia în considerare influența variației rezistenței barei, cu temperatura,

nu se ține seama de influența încălzirii mașinii asupra cuplului,

se neglijează transmisia de căldură pe la părțile frontale ale bobinei și la pornire (se admite o temperatură constantă a miezului polului în timpul pornirii), se neglijează pierderile în oțel,

se consideră procesul încălzirii barei la pornire adiabatic.

Este interesant de subliniat că pentru a se asigura o funcționare sigură a unui motor sincron la pornirea în asincron este necesar ca distribuția curenților în bare să fie cît mai uniformă. Dacă diferența dintre curenții din două bare vecine este mare în timpul pornirii aceasta duce la neuniformitatea încălzirii înfășurării și poate duce la avarii. Din această cauză după cum se menționează în lucrare au avut loc avarii la o serie de motoare sincrone de mare putere.

Calculul cuplului s-a efectuat atît după o metodă stabilită anterior de primul autor cît și după formula cunoscută:

$$M = \frac{U_1^2}{2}\left[\frac{1}{jX_d(js)} + \frac{1}{jX_q(js)}\right]_{Re},$$

reactanțele $X_d(js)$, $X_q(sj)$ fiind însă calculate după metoda dată în lucrare. Calculînd după metoda din urmă, eroarea maximă găsită între calcul și experiență a fost de 13% în timp ce cu prima metodă eroarea maximă a depășit în unele puncte 30%.

În capitolul 7 se analizează problema:

Sarcina nesimetrică și oscilațiile forțate ale mașinii sincrone.

În acest capitol se face următoarea observație interesantă și anume: Motoarele sincrone pentru antrenarea compresoarelor funcționează în regim staționar cu un unghi intern $\theta_0 = 20-30°$. Prin urmare $\cos^2\theta \gg \sin^2\theta$, iar din expresia cuplului de amortizare

$$M_a(jk) = U_1^2 j\left[\frac{\sin^2\theta_0}{jX_d(jk)} + \frac{\cos^2\theta_0}{jX_q(jk)}\right],$$

rezultă că rolul cel mai important revine circuitului de amortizare transversal. De aceea la adoptarea amortizorului pentru motoarele destinate acționării compresoarelor, barele apropiate de axa polului se execută din cupru, iar cele distribuite la marginile pieselor polare din alamă. Astfel se asigură simultan mărirea cuplului de amortizare la oscilații și mărirea cuplului de pornire.

În capitolul 8 se analizează *pierderile în înfășurarea de amortizare la regim sincron staționar* produse de armonicile de dentură ale cîmpului magnetic.

Pentru micșorarea pierderilor suplimentare de dentură se recomandă alegerea unui pas dentar al amortizorului apropiat de pasul dentar al statorului și adoptarea înclinării crestăturilor rotorului cu un pas statoric. În acest caz este necesară izolarea barelor pentru a evita închiderea curenților de la bare la miezul polului.

Capitolul 9 examinează: *Pierderile în înfășurarea de amortizare la sarcină constituită de redresor pentru tracțiune sau de invertor.*

În capitolul 10 intitulat *Forțarea excitației*, se subliniază rolul redus al înfășurării amortizoare asupra fenomenelor de la forțarea excitației.

În capitolul 11 *Influența înfășurării amortizoare asupra stabilității la funcționarea în paralel și supratensiunile în regimul dinamic al mașinilor sincrone* se arată pe baza unei bibliografii în majoritate recentă că influența înfășurării de amortizare asupra stabilității dinamice este favorabilă. De asemenea, se asigură cu ajutorul înfășurării de amortizare cu inele de conexiune complete o micșorare importantă a supratensiunilor care apar la scurtcircuite nesimetrice.

În capitolul 12 se dau indicații *Despre alegerea înfășurărilor de amortizare ale mașinilor sincrone.*

În ansamblu, lucrarea este concepută potrivit obiectului propus. În literatură s-au dezvoltat pînă în prezent două căi de tratarea problemei înfășurării amortizoare:

— fie se admite o distribuție anumită a curenților în barele amortizorului — cale adoptată de Talaat, Talalov, Tuschak, Nicolaide ș. a.,

— fie se evită ipoteza asupra distribuției curenților și se stabilește o schemă echivalentă a mașinii cu înfășurare de amortizoare, cale adoptată de Linville, Knorr, precum și de autorii lucrării. Această metodă este potrivită îndeosebi pentru bare amortizoare cu impedanțe de scăpări inegale.

Lucrarea excelează printr-o prezentare sistematică a problemei și prin noi contribuții privind calculul parametrilor înfășurării amortizoare.

De observat că se putea trece peste prezentarea detaliată a deducerii ecuațiilor tensiunilor circuitelor de amortizare; în schimb erau necesare explicații suplimentare referitoare la stabilirea factorilor de raportare.

Exemplul de calcul dat în lucrare este deosebit de util pentru proiectarea mașinilor sincrone cu înfășurări amortizoare.

C. Bălă și *A. Nicolaide*

LUCRĂRI APĂRUTE ÎN EDITURA ACADEMIEI R.P.R.

CĂLIN ADRIAN VASILESCU, PERICLE SVORONOS şi VICTOR PIMSNER, **Exploatarea raţională a gazelor naturale**, 367 p. + 7 pl., 26,40 lei.

A. MORARU, **Amplidina (maşina electrică amplificatoare de curent continuu cu cîmp transversal)**, 328 p. + 2 pl., 14,90 lei.

GH. CARTIANU, **Modulaţia de frecvenţă** (în limba rusă), 579 p. + 7 pl., 39,10 lei.

GR. C. MOISIL, **Circuite cu tranzistori**, vol. I, 142 p., 8,25 lei ; vol. II, 156 p., 8,55 lei.

* * * **Probleme de automatizare, II. Folosirea maşinilor electronice de calcul în industrie şi economie. Extrase din lucrările prezentate la Consfătuirea asupra maşinilor electronice de calcul (ianuarie 1960)**, 171 p., 8,55 lei.

* * * **Probleme de automatizare, III. Sesiunea asupra problemelor teoretice şi practice privitoare la automatizările industriale (13 octombrie 1960)**, 188 p., 8,80 lei.

* * * **Probleme de automatizare, IV. Sesiunea asupra problemelor teoretice şi practice privitoare la automatizările industriale (noiembrie 1961)**, 264 p. + 3 pl., 13,50 lei.

C. PENESCU, **Automatica şi telemecanica sistemelor energetice**, vol. III, 417 p. + 9 pl. 30,20 lei.

TRAIAN SĂLĂGEAN, **Fenomene fizice şi metalurgice la sudarea cu arcul electric a oţelurilor**, 219 p., 12,10 lei.

* * * **Tehnica nucleară în sprijinul producţiei. Unele realizări ale Institutului de fizică atomică al Academiei R.P.R.**, 253 p. + 1 pl., 14,30 lei.

N. TIPEI, V. N. CONSTANTINESCU, AL. NICA şi O. BIŢĂ, **Lagăre cu alunecare (calcul, proiectare, ungere)**, 436 p., 23,70 lei.

P. P. TEODORESCU, **Probleme plane în teoria elasticităţii**, vol. I, 996 p. + 6 pl., 42,80 lei.

E. ZAHARESCU, **Contribuţii la studiul capacităţii portante a fundaţiilor**, 300 p. + 4 pl., 16,40 lei.

V. VISARION, **Elemente pentru calculul plăcilor curbe subţiri elastice**, 385 p., 16,80 lei.

M. SOARE, **Application des équations aux différences finies au calcul des coques**, 460 p. + + 8 pl., 33,80 lei.

T. OROVEANU, **Scurgerea fluidelor prin medii poroase neomogene**, 329 p., 16,30 lei.

* * * **Sesiunea ştiinţifică jubiliară a Institutului de mecanică aplicată „Traian Vuia" al Academiei R.P.R.**, 445 p. + 1 pl., 23,30 lei.

F 2701

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

STUDII ȘI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

SERIA A

ENERGETICĂ GENERALĂ ȘI ELECTROENERGETICĂ

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
St. cerc. energ. Vol. 13 Nr. 3-A p. 331 — 449 București 1963

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Seria A

ENERGETICĂ GENERALĂ ŞI ELECTROENERGETICĂ

Tomul XIII, nr. 3, 1963 Apare de 4 ori pe an

COMITETUL DE REDACŢIE

Acad. I. S. GHEORGHIU;
Acad. R. RĂDULEŢ
— *redactor responsabil*;
Acad. A. AVRAMESCU,
Acad. M. BERCOVICI,
M. MARINESCU, membru corespondent al Academiei R.P.R.;
C. APETREI — *redactor responsabil adjunct*;
E. ARIE — *secretar ştiinţific*;
C. BĂLĂ;
CS. NAGY.

Redacţia: BUCUREŞTI, Şos. Vitan nr. 236

EDITORIAL

S-au împlinit, la 9 iunie a. c., 15 ani de la organizarea Academiei Republicii Populare Romîne. Vechea Academie Romînă a fost mai mult un for de consacrare, unde acționa, în primul rînd, principiul promovării intereselor burgheziei. Această instituție întreținea cultul așa-zisei „științe pure" — a științei ruptă de nevoile practicii. Academia veche nu dispunea de institute proprii de cercetare și nu era interesată de conducerea activă a muncii științifice și culturale din țara noastră.

În anul 1948, sub conducerea partidului, s-a organizat o instituție academică de tip nou, instituție cu caracter activ, strîns legată de nevoile poporului și avînd menirea de a dezvolta și folosi cuceririle științifice și culturale, pentru construirea socialismului în patria noastră.

În cuvîntarea rostită, la prima Sesiune a Academiei R.P.R., tovarășul Gh. Gheorghiu-Dej a definit astfel sarcinile și orientarea muncii științifice : „gîndirea științifică trebuie să fie în strînsă legătură cu rezolvarea justă a problemelor pe care le ridică viața practică... Dar nu trebuie să uităm niciodată că sarcina științei este să satisfacă trebuințele poporului și de aceea — în toate realizările lor — oamenii de știință, litere și artă, trebuie să tindă ca rezultatele pe care le obțin în cercetările lor teoretice, să-și poată găsi cît mai repede o valorificare practică".

Academia R.P.R., cel mai înalt for științific din patria noastră, are sarcina de a rezolva la un înalt nivel, problemele științifice, ridicate de dezvoltarea economiei naționale și culturii noastre, de pe poziția ideologică a clasei muncitoare, de a pune în valoare tot ce este progresist în trecutul țării noastre, contribuind astfel în mod activ la efortul susținut al întregului popor muncitor, la desăvîrșirea construirii socialismului.

În țara noastră, datorită politicii partidului și guvernului, s-a asigurat un avînt nemaiîntîlnit al economiei naționale, al înfloririi multilaterale a științei și culturii.

Statul nostru socialist, a asigurat cercetării științifice condiții din cele mai favorabile, investind fonduri importante pentru dezvoltarea bazei materiale a cercetării și promovarea științei.

Astfel, în cadrul Academiei au fost înființate 33 de institute și 7 centre de cercetare, nu numai în București dar și în centrele universitare din

provincie, unde Academia R.P.R. are unități de cercetare și anume : Filialele din Iași și Cluj și Bazele de cercetări din Timișoara și Tg. Mureș.

Organizarea pe baze noi a Academiei R.P.R., inițiată și condusă de partid, și noua orientare a activității ei, a constituit o necesitate obiectivă, legată de marile prefaceri economice și sociale din țara noastră și marchează un moment important al desfășurării revoluției noastre culturale.

Oamenii de știință din R.P. Romînă au răspuns cu cinste și devotament chemării partidului și s-au integrat în frontul de luptă și muncă al harnicului nostru popor muncitor, inițiind cercetări care deschid noi căi progresului, care interesează economia și cultura noastră socialistă. În cadrul Academiei R.P.R. au crescut numeroase cadre tinere de valoare. Lucrările de cercetare științifică în cei 15 ani s-au desfășurat, an de an, într-un ritm din ce în ce mai intens, mai cuprinzător, mai planificat. S-a întărit progresiv legătura dintre știință și sarcinile construirii socialismului.

Lucrările oamenilor de știință romîni sînt apreciate atît în țară cît și peste hotare, unde contribuția științei romînești se bucură de prestigiu din ce în ce mai mare.

Linia urmată de Institutul de energetică în dezvoltarea activității sale a fost aceea de a îmbina cercetarea la cel mai înalt nivel cu aplicarea în practică a rezultatelor cercetărilor. În cei aproape 15 ani trecuți de la înființarea institutului, cîmpul problemelor atacate s-a lărgit o dată cu creșterea și cu perfecționarea cadrelor sale. Această dezvoltare a preocupărilor institutului se oglindește și în publicația sa periodică : revista „Studii și cercetări de energetică".

Primul număr al revistei a apărut în anul 1951, iar, începînd din anul 1962, revista apare în două serii paralele : seria A, de energetică generală și electroenergetică — și seria B, de termoenergetică și combustibili solizi. Lucrările mai importante și de interes mai general apar și în revista „Revue d'Eléctrotechnique et d'Enérgétique", în limbi de circulație internațională.

Preocupările institutului pentru valorificarea optimă a resurselor energetice ale țării sînt reflectate în numeroase articole publicate în revista în limba romînă și în special în cele din domeniul energeticii generale. Cercetările privind structura și dinamica consumurilor de energie de diferite forme și diferite utilizări, îmbinate cu studiile de normare și reducere a consumurilor specifice de energie, constituie, alături de lucrările privind inventarierea resurselor energetice, cercetări de bază pentru optimizarea soluțiilor energetice. O nouă fază a acestei probleme, atacată în ultimii ani, este elaborarea metodologiei pentru calculul bilanțurilor energetice generale și parțiale și pentru optimizarea bilanțurilor energetice. Contribuțiile originale în legătură cu această problemă au fost sintetizate în articole publicate în aceeași revistă.

Datorită particularităților producerii, transportului și distribuției energiei electrice, s-a acordat o atenție deosebită problemelor optimizării structurii și exploatării sistemelor electroenergetice. În paginile revistei au fost publicate principalele contribuții aduse în studii pregătitoare pentru rezolvarea acestei probleme, ca : studiul curbei de sarcină, studiul

daunelor produse de întreruperea alimentării unor consumatori cu energie electrică, determinarea rezervei de putere necesară într-un sistem electroenergetic, calculul repartiției optime a sarcinilor între centralele unui sistem electroenergetic.

În legătură cu mărirea siguranței de funcționare și sporire a eficacității economice a regimurilor sistemelor electroenergetice, s-au elaborat și publicat metode originale pentru calculul stabilității statice și dinamice, al supratensiunilor de origine internă și externă, al efectelor reglajului automat al tensiunilor, frecvenței și puterilor — permițînd alegerea celor mai eficace variante tehnice. În ultimii ani, metodele de calcul propuse au fost adaptate folosirii calculatoarelor electronice, iar rezultatele teoretice obținute au fost verificate și completate prin cercetări experimentale, pe modele și pe viu.

Ca elemente componente ale sistemului electroenergetic, mașinile electrice și transformatoarele au format obiectul a numeroase studii; în legătură cu ele s-au publicat rezultate importante, avînd ca obiectiv final optimizarea constructivă și funcțională, pe baza unei metodologii de proiectare originală unitară.

Comportarea instalațiilor electroenergetice în exploatare a format și obiectul lucrărilor privind studiul izolației liniilor și stațiunilor electrice.

Instalațiile experimentale proiectate și realizate în institut, pentru studiul problemelor amintite: un model electrodinamic, instalații de producere și măsurare a tensiunilor înalte, cum și două calculatoare electronice, au comportat adaptarea de soluții noi, care s-au reflectat în articole sau în note publicate.

În paginile revistei s-au reflectat de asemenea și numeroase contribuții originale cu caracter teoretic sau aplicativ aduse în domeniul electrotehnicii. Relevăm rezolvarea unor probleme de curenți variabili în conductoare masive mobile și imobile cu aplicații la calculul unor frîne de inducție, ambreiaje electromagnetice, mașini electrice speciale, cuptoare de inducție etc.; calculul încălzirii contactelor și a unor tipuri de conductoare masive; dezvoltarea teoriei sistemelor electromecanice cuplate prin forțe electromagnetice, cu aplicație la motoarele cu mișcare alternativă etc. În domeniul teoriei sistemelor automate, relevăm lucrările originale de elaborare a unor noi criterii de stabilitate a sistemelor neliniare.

Creșterea continuă a nivelului științific, creșterea gradului de complexitate și adîncirea aspectelor economice ale problemelor concrete tratate ilustrează efortul depus de membrii Academiei și de cercetătorii Institutului de energetică pentru îndeplinirea sarcinilor trasate de partid Academiei R.P.R.

Comitetul de redacție

PROBLEME RIDICATE DE NECESITATEA DEZVOLTĂRII CONTINUE A BAZEI ENERGETICE

DE

CS. NAGY şi V. CARACUDOVICI

620.92 : 621.311.1

1. DEFINIREA NOŢIUNILOR UTILIZATE

Una dintre problemele mari ale epocii noastre o constituie acoperirea necesităţilor de energie primară. Acest lucru se reflectă în preocuparea pe care o au majoritatea ţărilor pentru dezvoltarea resurselor energetice, pentru raţionalizarea consumului de energie prin adoptarea proceselor tehnologice cu consum de energie redus, pentru folosirea la maximum a resurselor secundare de energie şi pentru evitarea risipei de energie sub orice formă.

În legătură cu aceasta, în raportul ţinut la Congresul al III-lea al P.M.R., tovarăşul Gheorghe Gheorghiu-Dej arăta că: „Mersul înainte al economiei naţionale este condiţionat de creşterea corespunzătoare a BAZEI ENERGETICE"*). Creşterea producţiei industriale, ridicarea nivelului de trai, ritmurile de creştere a producţiei sînt condiţionate de acoperirea necesităţilor de energie primară. Resursele energetice clasice ale lumii sînt foarte mari, dar nu inepuizabile şi din acest motiv, problema aceasta merită o atenţie deosebită.

În acest articol se va încerca să se dea un răspuns la problema posibilităţilor de satisfacere a nevoilor de energie primară în general şi a ne-

*) Gh. Gheorghiu-Dej, *Raport la cel de-al III-lea Congres al P.M.R.*, p. 27, Edit. politică, 1960.

cesităţilor de combustibili fosili în special şi se vor trage unele concluzii referitoare la direcţiile de cercetare în domeniul energeticii, bazate pe necesitatea economică a satisfacerii acestor nevoi.

În cele ce urmează s-a făcut distincţie între resursele de energie primară care se referă la toate formele de energie, atît cele epuizabile (combustibili clasici, energie nucleară etc.) cît şi cele regenerabile (energie hidraulică, geotermică, solară, eoliană etc.) şi resursele de combustibili clasici sau fosili care se referă la combustibili utilizaţi astăzi ca bază energetică (cărbuni, petrol, gaze naturale etc.).

S-au studiat separat combustibilii fosili, avînd în vedere caracterul lor limitat în raport cu creşterea rapidă a necesităţilor. Ei acoperă astăzi cea mai mare parte a necesităţilor de energie însă în viitor ponderea lor probabil va scade.

Pentru evaluarea şi compararea resurselor de energie primară, în literatura de specialitate se practică încă metoda de a se multiplica potenţialul anual al resurselor regenerabile (spre exemplu potenţialul hidroenergetic) cu un număr de ani variind între 50 şi 1 000 şi a le considera în acest fel drept resurse epuizabile, ceea ce nu reflectă realitatea.

Baza de pornire a unui studiu referitor la acoperirea necesităţii de energie primară de toate felurile trebuie să fie cunoaşterea rezervelor din resursele existente epuizabile, a potenţialului anual pentru resursele regenerabile şi a ritmurilor de creştere a consumului de energie primară.

Problema mărimii rezervelor cunoscute şi a dinamicii lor în viitor este foarte dificilă, întrucît se bazează pe evaluări făcute prin metode diferite, în raport cu gradul lor de cunoaştere.

În lucrarea de faţă se caută să se trateze mai corect problema termenului de epuizare*), luînd în considerare şi dinamica creşterii consumului de energie. Procedeul care se mai utilizează în unele lucrări, de a împărţi rezervele cunoscute sau evaluate cu consumul de energie pe anul în curs spre a determina termenul de epuizare, duce la rezultate eronate şi nesemnificative.

2. TENDINŢELE DE DEZVOLTARE ALE CONSUMULUI DE ENERGIE PRIMARĂ PE PLAN MONDIAL

Pentru a determina tendinţele în creşterea consumului de combustibili fosili, s-a analizat variaţia acestui consum în decursul unui secol (între anii 1860 şi 1960). În tabela 1 este redată creşterea consumului mondial de combustibili fosili şi variaţia ratei medii anuale de creştere a acestui consum pe decenii.

În figura 1 s-a reprezentat variaţia ratei creşterii anuale pe decenii a consumului mondial de combustibili fosili şi *tendinţa liniară* (tendinţa calculată pe baza metodei minimelor patratelor) a variaţiei acestei rate.

Se observă că pentru secolul trecut în ansamblu, rata de creştere este destul de stabilă, ea tinde să scadă mai pronunţat la începutul seco-

*) Termenul de epuizare reprezintă numărul de ani în care resursa respectivă cunoscută s-ar consuma dacă se admite un ritm de consum constant sau variabil.

Tabela 1

Consumul mondial de combustibili fosili

Anul	1860	1870	1880	1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960
Consumul în 10^9 kWh*)	1073	1666	2612	4043	6073	9353	11234	12925	15689	20224	33200**)
$q_{mediu\ anual}$		1,045	1,046	1,045	1,041,	1,045	1,018	1,014	1,020	1,026	1,051

*) Raportul P/902 ţinut la „Conferinţa pentru utilizarea paşnică a energiei atomice" din 1955 la Geneva.
**) Calculat pe baza Annuaire Statistique O.N.U., 1961.

Tabela 2

Consumul de energie primară pe grupuri de ţări

Rata medie a creşterii anuale	America de Nord	Europa Occid.	Oceania	Africa	Rest. America (SUD)	Extrem. Orient	Orient. Mijl.	Reg. Mării Caraibilor	Ţările Socialiste	Mondial	U.R.S.S.**)	S.U.A.
q*)	1,028	1,035	1,042	1,043	1,058	1,080	1,087	1,090	1,105	1,055	1,083	1,020

*) Pentru perioada 1955–1960 – Calculat după Annuaire Statistique O.N.U., 1961.
**) Pentru perioada 1950–1960 – Calculat după „Erdöl und Kohle", nr. 8, 1962, p. 154.

lului (1910–1920), iar în ultimul deceniu (1950–1960) se observă o urcare bruscă peste valorile maxime de mai înainte. Se observă de ase-

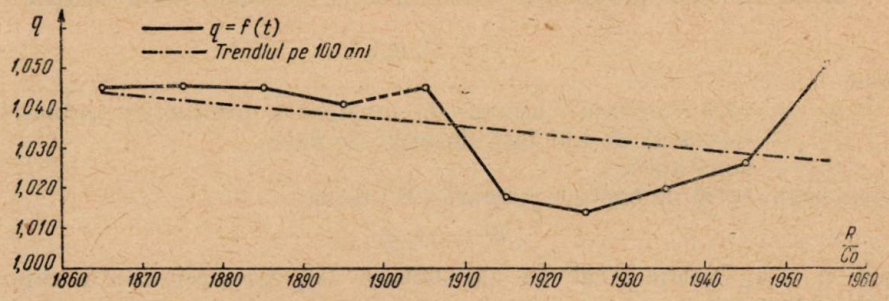


Fig. 1. — Rata creşterii consumului mondial de combustibili fosili şi tendinţa de variaţie a acesteia între anii 1860–1960.

menea, o tendinţă generală de scădere pe întreaga perioadă, însă avînd în vedere dezvoltarea din ultimul timp, această tendinţă trebuie tratată cu rezervă.

Pentru a elucida cauza urcării brusce a ratei în ultimul deceniu s-a calculat rata creşterii consumului de energie primară pe grupuri de ţări. Rezultatul este redat în tabela 2.

Analizînd datele din tabelele 1, 2 şi figura 1 se pot trage unele concluzii asupra variaţiei ratei de creştere a consumului de combustibili fosili:

— Rata creşterii (q) a consumului mondial de combustibili fosili are o uşoară tendinţă de scădere, care însă este întreruptă în deceniul 1950—1960. Totuşi, numai pe baza tendinţelor constatate din această serie lungă de timp nu se poate trage o concluzie univocă asupra caracterului viitor a acestei variaţii, avînd în vedere desfăşurarea unei revoluţii tehnice impetuoase şi faptul că trăim într-o epocă de transformări sociale.

— Urcarea ratei (q) în ultimul deceniu este cauzată de valoarea sa foarte ridicată pentru ţările din Orient şi Reg. Mării Caraibilor şi îndeosebi pentru ţările socialiste, a căror pondere în producţia mondială de combustibili creşte mereu*). O altă cauză a urcării este faptul că, în ultimul timp, majoritatea ţărilor au apelat mult mai masiv în acoperirea necesităţilor de energie primară, la petrol şi gaze naturale, lucru care se leagă şi de tendinţa foarte pronunţată de electrificare cu mijloace cît mai eficiente şi cu investiţii cît mai reduse. Această tendinţă probabil nu se va putea menţine mai mult decît 1 pînă la 2 decenii.

— Pentru consumul total de energie primară totuşi se poate admite o rată constantă de creştere. Aici trebuie făcută abstracţie de perioada incipientă de industrializare a diferitelor ţări, care pot avea, în această fază, rate de creştere extrem de ridicate, care însă tind către o valoare stabilă. Această valoare pentru ţările socialiste este în general mai ridicată decît pentru restul ţărilor.

Dacă indicele producţiei industriale (I) variază după relaţia

$$I = C_1 q_1^t, \tag{1}$$

unde

q_1 — rata constantă anuală de creştere a producţiei industriale,
t — numărul de ani faţă de anul de bază,
C_1 — constantă,

şi consumul total de energie primară (W) după

$$W = C_2 q_2^t, \tag{2}$$

unde $q_1 \leqslant q_2$, coeficientul de elasticitate (ε), care reprezintă raportul creşterii funcţiei (1) cu un procent dat, faţă de creşterea corespunzătoare a funcţiei (2)

$$\varepsilon = \frac{\frac{\Delta W}{W}}{\frac{\Delta I}{I}}. \tag{3}$$

*) De exemplu, ponderea ţărilor socialiste în producţia mondială de cărbuni a crescut între anii 1950—1959 de la 28,2 la 48,9%, iar producţia de petrol de la 8,4 la 15% („Probleme ale păcii şi socialismului", nr. 11, 1960, supliment, p. 5).

Prin trecerea la limită a relației (3) se poate obține expresia analitică simplă [10]:

$$\varepsilon = \frac{\mathrm{d} \ln W}{\mathrm{d} \ln I}, \tag{3'}$$

de unde

$$\varepsilon = \frac{\dfrac{\mathrm{d} \ln W}{\mathrm{d}t}}{\dfrac{\mathrm{d} \ln I}{\mathrm{d}t}} = \frac{\dfrac{\mathrm{d} \ln W}{\mathrm{d}W} \cdot \dfrac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t}}{\dfrac{\mathrm{d} \ln I}{\mathrm{d}I} \cdot \dfrac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}} = \frac{I}{W} \cdot \frac{c_2 q_2' \ln t}{c_1 q_1' \ln t} =$$

$$= \frac{c_1 q_1'}{c_2 q_2'} \cdot \frac{c_2 q_2' \ln t}{c_1 q_1' \ln t} = 1.$$

De aici rezultă că o creștere cu 1% a producției industriale atrage după sine o creștere de 1% a consumului de energie primară.

Analizînd calitativ factorii care acționează asupra creșterii lui W în funcție de I se poate arăta că

— creșterea necontenită a randamentului de utilizare a energiei primare și tendința de scădere a consumului specific de energie primară pentru diferite procese tehnologice are ca efect o tendință de scădere a ritmului q_2 în ipoteza q_1 = const., pe cînd mecanizarea, electrificarea și automatizarea proceselor de producție, creșterea consumului casnic și gospodăresc, înlocuirea energiei biologice (forța umană și a animalelor de lucru) cu energie obținută din alte resurse și trecerea la produse mai complexe și cu un grad mai mare de prelucrare, contribuie la ridicarea lui q_2.

Se poate admite că acești doi factori se vor compensa și q_2 tinde spre o valoare stabilă pentru consumul total de energie primară.

3. TERMENUL DE EPUIZARE

Înainte de a trage concluzii definitive referitor la rata de creștere a consumului de combustibili fosili și de energie primară totală, se vor studia unele legități, cu caracter general, referitoare la variația acestor consumuri de resurse și la termenele lor de epuizare (t_e).

Se vor studia două variante:

— varianta cu rata de creștere constantă și

— varianta cu rata de creștere scăzătoare după formula lui Daniel [9].

Pentru o rată constantă de creștere, valoarea consumului de energie primară sau de combustibili va fi

$$C_k = C_0 q^k \tag{4}$$

unde

C_k — consumul de energie primară în anul k;
C_0 — consumul de energie primară în anul de bază $k = 0$;
q — rata creşterii consumului de energie primară;
k — numărul anilor faţă de un an de bază.

În ipoteza unei rate variabile scăzătoare care la infinit tinde către 1

$$q(k) = 1 + \frac{a}{t - t_0}, \tag{5}$$

unde

$q(k)$ — rata creşterii anuale a consumului în anul k;
t — anul calendaristic pentru care se calculează rata;
t_0 — anul de bază ales sau determinat pe baza matematică;
a — constantă.

În acest ultim caz, dinamica consumului de energie va fi determinată de formula

$$C_k = C_0 \prod_{i=1}^{k} q_i. \tag{6}$$

Pe baza ipotezei $q(k) = \text{const.}$ se poate calcula termenul de epuizare t_e a unei resurse

$$t_e = \frac{\lg\left[1 + \frac{R}{C_0}(q-1)\right]}{\lg q} - 1 \tag{7}$$

unde

C_0 — consumul de energie în anul de bază;
R — rezervă totală din resursa de energie.

Se observă că t_e se poate exprima ca

$$t_e = f\left(\frac{R}{C_0}, q\right). \tag{7'}$$

Alegînd $\frac{R}{C_0}$ ca variabilă independentă şi q ca parametru, se obţine o familie de curbe, reprezentată în figura 2.

Din figura 2 se pot trage unele concluzii interesante în legătură cu gospodărirea energiei şi orientarea cercetărilor energetice.

Ca exemplificare se va da o analiză a situaţiei mondiale a resurselor combustibile.

Rezervele mondiale cunoscute de combustibili fosili sînt de circa $6\,000.10^9$ t.c.c. [1]*) iar consumul de combustibili fosili în 1960 de circa $4{,}225.10^9$ t.c.c. [2].

*) În literatură sînt multe date destul de contradictorii însă evaluările cele mai mari nu depăşesc $15\,000.10^9$ t.c.c.

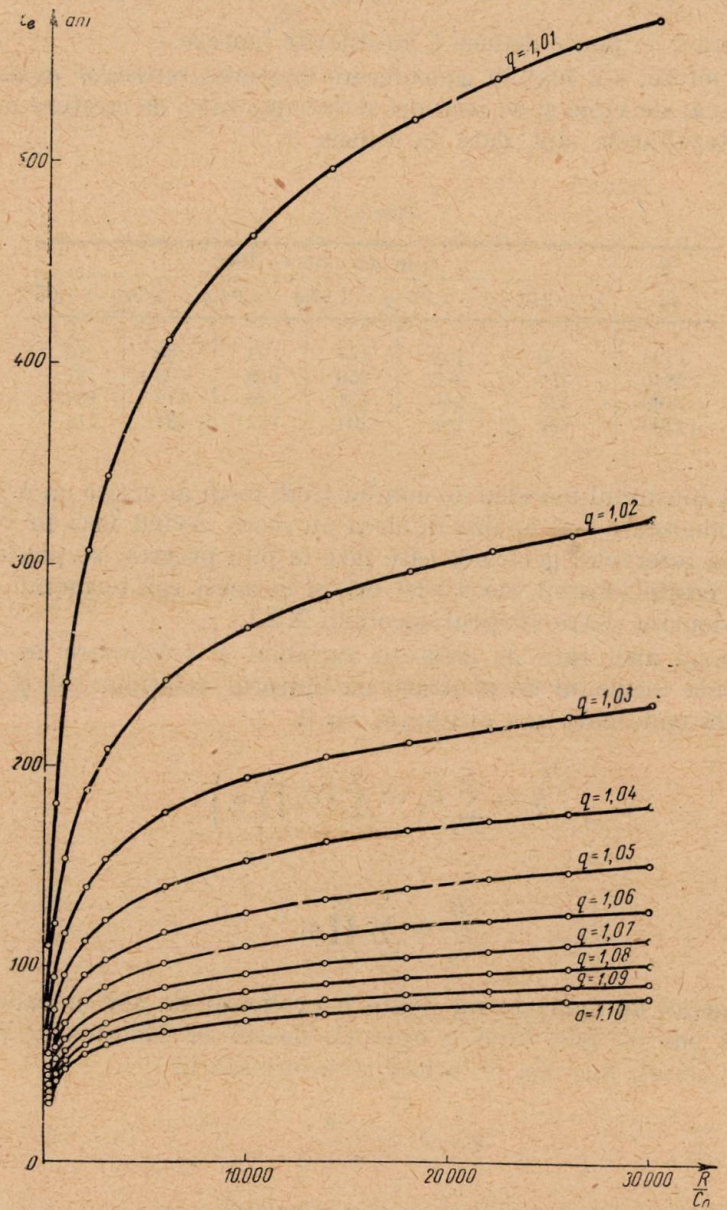


Fig. 2. — Termene de epuizare (t_e) a unei resurse în funcţie de raportul între rezerva acestei resurse (R) şi consumul ei în anul de bază C_o — pentru diverse rate constante de creştere anuală (q).

De aici se poate determina raportul $\frac{R}{C_0}$ pentru rezervele cunoscute şi din figura 2 se poate deduce t_e în diferite ipoteze.

Ca ipoteze, s-a luat în considerare creşterea *rezervelor astăzi cunoscute* de două, de cinci şi de zece ori şi variaţia ratei de creştere de la 1,01 la 1,06. Rezultatele sînt date în tabela 3.

Tabela 3

$\frac{R}{C_0}$	t_e în ani faţă de 1960					
	$q = 1{,}01$	$q = 1{,}02$	$q = 1{,}03$	$q = 1{,}04$	$q = 1{,}05$	$q = 1{,}06$
1420	272	169	127	102	88	75
2840	339	203	150	119	103	87
7100	428	250	181	142	119	104
14200	499	286	204	162	131	114

Dacă consumul mondial de combustibili fosili ar creşte cu 4% anual, rezervele cunoscute s-ar epuiza în circa un secol. Avînd însă în vedere că cunoaşterea rezervelor geologice este încă în plin progres, se poate admite că ele vor creşte sensibil (de 5—10 ori) şi în acest caz termenul de epuizare s-ar deplasa către sfîrşitul secolului XXI.

În cazul unei rate de creştere variabile şi scăzătoare în timp, se poate calcula termenul de epuizare cu ajutorul relaţiilor (5) şi (6). Rezerva totală cunoscută sau evaluată, va fi

$$R = \sum_{k=1}^{t_e} C_k = \sum_{k=1}^{t_e} \left(C_0 \prod_{i=1}^{k} q_i \right),$$

de unde

$$\frac{R}{C_0} = \sum_{k=1}^{t_e} \prod_{i=1}^{k} q_i \cdot \tag{8}$$

Termenul de epuizare nu poate fi explicitat de aici şi calculul trebuie făcut pas cu pas, fiind o operaţie destul de laborioasă. Pentru a construi o abacă, formula (5) a fost transformată în

$$q = 1 + \frac{a}{k + b} \cdot \tag{5}$$

Calculul s-a executat pentru trei variante

$$q = 1 + \frac{0{,}4}{k + 10}, \tag{5a}$$

$$q = 1 + \frac{1{,}2}{k + 30}, \tag{5b}$$

$$q = 1 + \frac{3{,}6}{k + 90}. \tag{5c}$$

Rezultatele calculului sînt reprezentate în figura 3, unde raportul $\frac{R}{C_0}$ este variabila independentă iar parametrul variază după (5a), (5b) respectiv (5c).

Pentru exemplificare s-a luat din nou consumul mondial de combustibili clasici. S-a admis că în deceniul 1960—1970 consumul va creşte

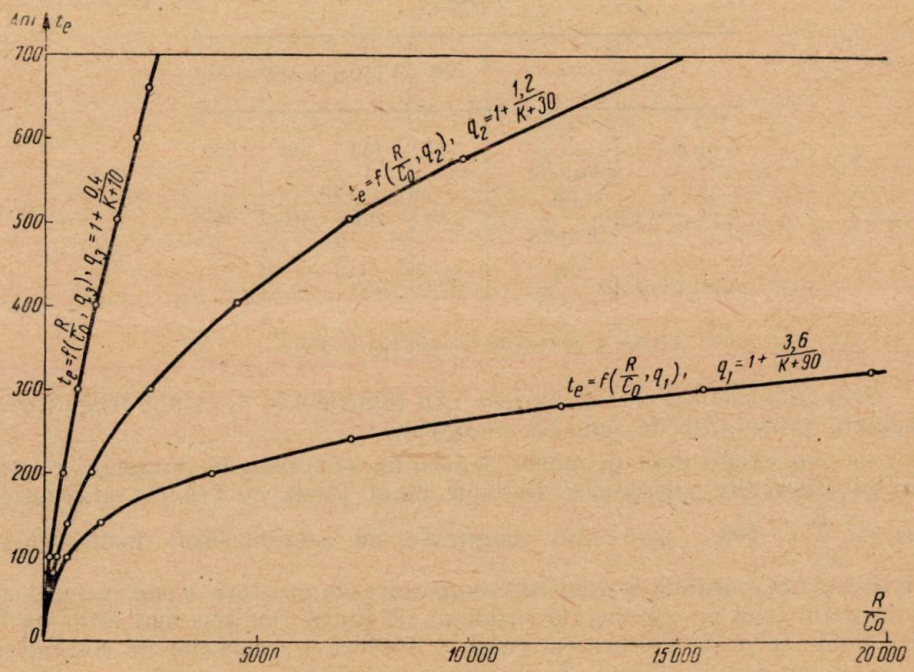


Fig. 3. — Termene de epuizare a unei rezerve în funcţie de R/C_0 în trei ipoteze de variaţie a lui q:

$q_1 = 1{,}04$ în anul de bază şi $q_1 = 1{,}03$ peste 30 ani,
$q_2 = 1{,}04$ în anul de bază şi $q_2 = 1{,}02$ peste 30 ani,
$q_3 = 1{,}04$ în anul de bază şi $q_3 = 1{,}01$ peste 30 ani.

cu 4% anual (avînd în vedere tendinţa generală de a solicita rezervele de gaz natural în scopuri energetice), iar începînd din 1970 (q) va scade după

una din formulele (5a), (5b), (5c). În această ipoteză consumul mondial de combustibili clasici în 1970 va ajunge la $6{,}25.10^9$ t.c.c. pe an iar rezerva astăzi cunoscută va scădea la

$$R_{1960} - \sum_{k=1}^{10} C_k = R_{1970} = 5\,943.10^9 \text{ t.c.c.}$$

iar

$$\frac{R_{1970}}{C_0} = \frac{5\,943}{6{,}25} = 950.$$

Admiţînd de asemenea o eventuală creştere a rezervelor cunoscute de 2,5 sau 10 ori, se obţin rezultatele din tabela 4*).

Tabela 4

$\frac{R}{C_0}$	950	1 900	4 750	9 500
t_e pt. $q = 1 + \frac{3{,}6}{k + 90}$	117	153	209	259
t_e pt. $q = 1 + \frac{1{,}2}{k + 30}$	185	265	405	565
t_e pt. $q = 1 + \frac{0{,}4}{k + 10}$	325	550	—	—

Obs. : Termenele de epuizare sînt calculate faţă de 1970.

Din tabelele 3 şi 4 şi îndeosebi din figurile 2 şi 3, se pot trage unele concluzii importante de politică energetică :

— Nu există nici un motiv pentru un pesimism în domeniul resurselor şi rezervelor energetice, întrucît chiar ţările cu resurse energetice mici, cu $\frac{R}{C_0} = 100 \ldots 200$ sînt asigurate cu combustibili fosili, chiar în ipoteza nefavorabilă a unei rate constante de creştere a consumului de combustibil fosil pe o perioadă suficient de lungă (cu atît mai mult că la toate ţările se poate admite cel puţin o dublare a rezervelor de combustibili fosili cunoscute astăzi). Între timp probabil se va rezolva problema utilizării economice a energiei nucleare pe bază de fisiune.

— Pentru prelungirea termenelor de epuizare este mult mai eficient să se scadă treptat rata de creştere a consumului de combustibili fosili, decît mărirea rezervelor. Această scădere trebuie să nu afecteze rata de creştere a consumului total de energie primară ci să fie rezultatul descărcării acestor resurse prin alte resurse noi. În acelaşi timp, se poate

*) Calculul fiind foarte laborios s-a executat pe o maşină electronică de calcul CIFA.

obține o scădere și prin îmbunătățirea randamentului total de utilizare a combustibililor fosili.

— Mărirea rezervelor (R) este totuși destul de eficientă, din punctul de vedere al prelungirii termenului de epuizare, pentru țările cu un raport mic $\frac{R}{C_0}$ (între 100—500). Această eficiență crește mult în ipoteza unei rate scăzătoare (chiar după formula (5a)).

— Este necesar în general, și pentru țările industriale în mod deosebit, ca energia nucleară începînd din 1970—75 să capete o pondere sensibilă și mereu crescîndă în bilanțul energiei primare, pentru a descărca resursele de combustibili fosili.

— Rezervele de uraniu și toriu sînt foarte mari, iar cele de deuteriu de 10^7 ori mai mari, decît cele de combustibili clasici [1]. Aceste resurse vor asigura necesitățile de energie primară pe un termen atît de lung, încît în acest timp omenirea va avea posibilitatea să rezolve problema resurselor de energie primară pe baze total noi și deocamdată, cel puțin în parte, neprevizibile, fără a scade ritmul creșterii consumului de energie primară totală. Rezolvarea unor asemenea probleme presupune însă o cunoaștere mai adîncă decît cea actuală a legilor de dezvoltare a materiei și presupune un progres mare și vertiginos al științei.

4. ROLUL RESURSELOR REGENERABILE ÎN ACOPERIREA NECESITĂȚILOR DE ENERGIE PRIMARĂ

Pentru descărcarea bilanțului de combustibili clasici este important a amenaja și utiliza resursele regenerabile, în deosebi forțele hidraulice și a găsi soluții rentabile pentru utilizarea pe scară largă a energiei solare și a altor resurse neclasice de energie.

În cele ce urmează se va căuta să se prezinte succint o evaluare a dinamicii contribuției acestor resurse la acoperirea bilanțului de energie primară pe plan mondial (tabela 5).

Admițînd pînă în anul 2000 o creștere a consumului de energie primară de 4% anual, în 1970 se va ajunge la un consum de $6{,}3.10^9$ t.c.c. iar în anul 2000 la circa 20.10^9 t.c.c. În anul 1960 acest consum este de $4{,}3.10^9$ t.c.c. Din tabela 5 rezultă că ponderea resurselor regenerabile în bilanțul energiei primare se menține între 1960—2000 în jurul valorii de 10%. Este probabil că în cursul acestui secol resursele regenerabile de energie, dacă se depun eforturi mari de cercetare și de investiții, își vor menține ponderea lor actuală.

De aici rezultă că resursele regenerabile nu vor putea contribui în mod esențial la micșorarea ratei creșterii consumului de combustibili clasici. În consecință, este necesar să se caute alte căi pentru micșorarea ratei creșterii consumului de combustibili fosili.

Tabela 5

Dinamica resurselor regenerabile pe plan mondial

Sursa de energie	Potenţial teoretic sau amenajabil 10^9 t.c.c.	Potenţial amenajat în 1960 10^9t.c.c.	Potenţial economic amenajabil pînă în anul 1970—10^9 t.c.c.	Potenţial economic amenajabil pînă în anul 2000 10^9 t.c.c.
Energie hidraulică	2,70[1])	0,08[2])	0,32[2])	0,78[2])
Lemne de foc	0,75[3])	0,19[3])	0,19[3])	0,25[3])
Deşeuri agricole[4])	—	0,15	0,15	0,20
Geotermie[5])	—	—	—	—
Maree şi valuri[6])	—	—	—	0,01
Energia eoliană	5 000[7])	—	—	0,07[8])
Căldura mării[9])	—	—	—	0,03
Energia solară[10])	250 000	—	0,03	0,75
Total	—	0,42	0,69	2,09

[1]) După E. Mosonyi [3] potenţialul hidroenergetic teoretic al lumii este de 5 600.10^6kW; cu 3 900 ore de utilizare acesta produce 22 000 10^9 kWh, respectiv 2,7.10^9 t.c.c.

[2]) După un articol din Archiv für Energiewirtschaft [4] în 1970 consumul de energie electrică din CHE va fi de 0,32.10^9 t.c.c. iar între 1970—2000 se admite o creştere anuală de 3%. Tot după [4] prod. CHE din lume în 1960 a fost de 670.10^9 kWh respectiv 0,08.10^9 t.c.c.

[3]) După P. P. Lazarev [1] — cantitatea potenţială anuală de producţie de lemne de foc este de 0,25.3.10^9 t.c.c. ar după [4] producţia de lemne este în prezent de 0,19.10^9 t.c.c. anual fără o tendinţă simţitoare de creştere. După [5] în 100 de ani (1950—2060) se vor consuma 50.10^9 t.c.c. S-a admis în 2000 0,25.10^9 t.c.c.

[4]) După Putnam [5] consumul de deşeuri agricole în 100 de ani va fi de 60.10^9 t.c.c. Se admite un consum ceva mai mic ca la lemne.

[5]) Putnam [5] indică o valoare neglijabilă pentru consumul de resurse geotermice.

[6]) În 1960 şi 1970 consumul de energie din maree şi valuri reprezintă o mărime neglijabilă în bilanţul energetic Admiţînd o putere instalată de 40.10^6 kw în anul 2000, ceea ce este probabil limita superioară, cu 2 500—3 000 ore de utilizare anuală, corespunde la circa 0,01.10^9 t.c.c.

[7]) Evaluînd după datele lui P. P. Lazarev [1].

[8]) Energia eoliană în 1960—1970 este o mărime neglijabilă în bilanţul energetic mondial. Putnam admite că în 100 ani se vor consuma 3,5.10^9 t.c.c. [5] ceea ce corespunde la 0,035 t.c.c. anual. S-a admis 0,07.10^9 t.c.c. în anul 1980.

[9]) Putnam [5] a evaluat că în următorii 100 de ani se va consuma din căldura mărilor o cantitate care corespunde la o medie anuală de 0,017.10 t.c.c^9. În anul 2000 s-a admis 0,03.10^9 t.c.c.

[10]) După Lazarev [1] energia solară incidentă pe suprafaţa pămîntului este de 250 000.10^9 t.c.c. pe an. Este într-adevăr o cantitate imensă de energie, dar din cauza caracterului dispers al energiei solare şi al faptului că principial se va putea utiliza numai o fracţiune mică din această resursă, deoarece altfel se strică echilibrul climatic şi biologic al pămîntului, se poate conta numai pe o fracţiune mică din ea. Nu trebuie neglijat nici faptul că la baza majorităţi resurselor energetice din tabela 5 stă tot energia solară. Pe aceste considerente s-a admis că în 1970 se va utiliza această sursă, contribuind la bilanţul energetic mondial cu 0,03.10^9 t.c.c. pentru încălzirea apei, pregătirea hranei şi producerea frigului în zonele calde, iar pînă în anul 2000 s-a admis o creştere de 25 ori.

5. ALTE CĂI PENTRU PRELUNGIREA LUI t_e

Pentru un viitor mai apropiat se pot întrevede:

a) Creşterea ponderii energiei nucleare în bilanţul energiei primare (uraniu, toriu şi ulterior deuteriu);

b) Îmbunătăţirea randamentului de utilizare a acestor resurse*) prin — optimizarea bilanţului energetic naţional,

*) De combustibili clasici

— utilizarea rațională a energiei la consumatori,

— îmbunătățirea randamentului centralelor termoelectrice prin transformarea căldurii în energie electrică fără a trece prin treapta de energie mecanică.

Pentru a evidenția punctele unde se va putea interveni în mod eficient în această direcție, s-au analizat mai multe bilanțuri energetice [6], [7], între care și bilanțul energetic al R.P.R. S-a obținut următorul tablou al pierderilor de energie; din energia primară total consumată, se pierde:

— în procese de transformare finală (utilizare) a energiei	25—30%
— în centrale electrice și termice	15—20%
— în cocserii, furnale, gazogene	5—6%
— în diverse alte procese	4—5%
	49—61%

De aici rezultă că din punctul de vedere al gospodăririi energiei trebuie acordată o atenție deosebită energeticii industriale, recuperărilor de resurse secundare, urmăririi bilanțurilor și normelor de consum specific de energie etc.

Trebuie însă arătat că nesiguranța destul de mare care există în legătură cu stabilirea rezervelor, adică a numărătorului din raportul $\frac{R}{C_0}$, este oarecum compensată prin faptul că la rate de creștere mai mari de 3% anual, variațiile lui t_e cu R sînt destul de mici.

Din punctul de vedere al interpretării figurilor 2 și 3, trebuie remarcat că semnificația economică a apropierii de termenul de epuizare a resurselor de combustibili fosili nu este aceea a unei epuizări bruște în anul respectiv, ci o trecere treptată a consumului de combustibili din domeniul ratei de creștere constantă în domeniul ratei de creștere scăzătoare. Această tendință se poate manifesta cu decenii înaintea împlinirii termenului de epuizare prin frînarea consumului de combustibili, frînare care se produce spontan, din cauza creșterii greutăților de procurarea energiei și a creșterii prețurilor energiei.

Din cele arătate pînă acum rezultă că dezvoltarea economică în general și dezvoltarea cu ritmuri foarte ridicate a țărilor socialiste în special va pune probleme dificile în fața tuturor țărilor în domeniul asigurării bazei energetice.

Aceste probleme se vor putea rezolva numai cu o contribuție masivă a cercetărilor științifice.

6. IMPORTANȚA CERCETĂRILOR ENERGETICE

Știința, cercetările energice, trebuie să contribuie din plin la rezolvarea unor probleme stringente ale energeticii și în același timp să se ocupe cu acele cercetări fundamentale, care deschid căi noi în energetică, prin utilizarea unor noi resurse de energie și prin mărirea esențială a randamentelor de transformare a energiei. *Energetica ca știință trebuie să*

*devină în tot mai mare măsură o forţă de producţie nemijlocită**), aceasta este concluzia principală care se poate trage în legătură cu cele expuse mai sus.

Reducerea ratei de creştere a consumului de combustibili fosili încă de prin 1970—1975, atît în ansamblu pe plan mondial cît şi separat pentru majoritatea ţărilor, rezultă ca o necesitate economică determinată de caracterul limitat al rezervelor de combustibili, de creşterea rapidă a consumului de energie primară şi de utilizarea unei cantităţi din ce în ce mai mari de combustibili fosili ca materie primă pentru industrie. Acest aspect pune cercetărilor ştiinţifice o gamă largă de sarcini în diferite domenii.

Astfel trebuie întreprinse cercetări de lărgirea bazei energetice pentru :

— cunoaşterea mai temeinică a rezervelor de combustibili fosili;

— cunoaşterea şi utilizarea mai completă a resurselor energetice inepuizabile clasice (energie hidraulică, geotermică, lemne, deşeuri agricole şi forestiere);

— utilizarea eficientă a resurselor energetice inepuizabile neconvenţionale (energie solară, energie eoliană, energia mareelor, energia valurilor etc.);

— utilizarea energiei nucleare;

— descoperirea şi utilizarea a noi surse de energie.

De asemenea, trebuie cercetate căile pentru mărirea randamentului total al lanţurilor energetice pentru utilizarea combustibililor fosili.

Din cele expuse pînă acum se desprind unele concluzii referitoare la orientarea cercetărilor energetice din ţara noastră.

7. CONCLUZII

În domeniul lărgirii bazei energetice în ţara noastră atenţia principală trebuie îndreptată spre combustibilii fosili, întrucît raportul R/C_0 are o valoare relativ mică. Este deci necesar de a continua lucrările de prospecţiuni geologice cu metode moderne de investigaţie pentru descoperirea de noi rezerve şi precizarea rezervelor cunoscute.

În lărgirea bazei energetice rolul principal îl va avea în deceniile următoare utilizarea resurselor nucleare de fisiune iar ulterior de fuziune.

O parte importantă a rezervelor de combustibili fosili din ţara noastră o reprezintă cărbunii inferiori, ligniţi cu conţinut ridicat de cenuşă şi umiditate şi puncte coborîte de topirea zgurii. Aceşti combustibili reprezintă o rezervă energetică reală în cazul rezolvării unei exploatări şi extracţii economice şi a arderii lor în condiţii bune şi economice. De aceea, cercetările îndreptate spre arderea ligniţilor, spre brichetarea şi gazificarea lor, sînt de o importanţă deosebită.

Cercetările îndreptate spre lărgirea bazei de cocs pentru siderurgie prin cocsificarea cărbunilor slab aglutinanţi existenţi în ţara noastră, vor rezolva o problemă energetică importantă.

*) Acest lucru este valabil şi pentru cercetări cu caracter fundamental (energia nucleară şi transformarea directă a căldurii în energie electrică).

În domeniul cunoașterii și utilizării mai complete a resurselor energetice inepuizabile clasice, trebuie cercetate schemele optime de utilizare complexă a energiei hidraulice, pentru a se asigura valorificarea superioară a lor și creșterea ponderii acestor resurse în consumul de energie primară.

În domeniul utilizării eficiente a resurselor energetice inepuizabile neconvenționale, trebuie să se întreprindă cercetări referitoare la utilizarea energiei solare și eoliene, însă trebuie abordate căi mai eficiente decît cele clasice și utilizate actual în mod curent.

Asemenea cercetări revin în primă fază fizicienilor pentru elucidarea problemelor fizico-chimice principale și, ulterior, institutelor tehnice pentru rezolvarea problemelor legate de realizarea unor instalații pe scară industrială. Este însă util ca încă din prima fază să se realizeze o colaborare strînsă între fizicieni și ingineri.

Paralel, cu aceste cercetări cu o finalitate mai apropiată, oamenii de știință nu trebuie să piardă din vedere cercetările îndreptate spre descoperirea de noi surse de energie care trebuie să formeze rezerva științifică din domeniul energetic.

Din analiza bilanțului energetic al țării noastre, a rezultat că pentru reducerea ratei de creștere a consumului de combustibili fosili prin utilizarea lor mai rațională există încă rezerve importante la utilizarea, transformarea și transportul energiei și combustibililor.

Prima cale și cea mai eficientă, după cum rezultă din bilanț, este îmbunătățirea randamentului în transformările finale ale energiei, în procesul de producție. Cea mai mare parte a problemelor energetice de cercetare le ridică industria și de aceea energetica industrială capătă o importanță deosebită. Printre aceste probleme trebuie amintite:

— întocmirea și analiza bilanțurilor energetice industriale (pe întreprinderi);

— stabilirea și reducerea indicilor de consum specific de energie;

— utilizarea resurselor energetice secundare etc.

Aceste cercetări trebuie făcute la nivelul întreprinderilor, fiind legate de necesitățile lor imediate, pe baza unor lucrări cu caracter general și de metodică întocmite de institutele de cercetări.

În mod asemănător trebuie privite cercetările din celelalte domenii ale consumului de energie transporturi, agricultură, construcții etc.

În domeniul transformărilor și transporturilor de energie trebuie cercetate bilanțurile energetice generale pentru optimizarea lor, întrucît ele duc la îmbunătățirea randamentului energiei pe ansamblul economiei naționale. Din acest domeniu fac parte și cercetările legate de optimizarea structurii sistemului electroenergetic care conduc la același efect — reducerea consumului de combustibil pentru producerea de energie electrică.

În domeniul cercetărilor teoretice referitoare la îmbunătățirea randamentului de utilizare a energiei, de mare importanță sînt cele referitoare la transformarea directă a căldurii în energie electrică, fără trecere prin forma de energie mecanică, care pot duce la îmbunătățirea substanțială a randamentului producerii de energie electrică din combustibili.

În concluzie, trebuie subliniat faptul că intensificarea cercetărilor energetice în toate domeniile şi la toate nivelele la noi în ţară este o necesitate economică imperioasă.

Modul în care au fost analizate problemele resurselor energetice în acest articol şi metodica elaborată pentru analiza lor concretizată în abacele din figurile 2 şi 3, au un caracter de generalitate şi pot fi utilizate cu succes pentru analiza oricăror resurse materiale epuizabile.

FRAGEN DIE DURCH DEN STÄNDIGEN ANWUCHS DES ENERGIEVERBRAUCHES ERHOBEN WERDEN

ZUSAMMENFASSUNG

Auf Grund eines verallgemeinerten Studiums über die Erschöpfungsdauer einer Energiequelle werden eine Reihe von Schlußfolgerungen über die Verwertung des fossilen Brennstoffes und den künftigen Entwicklungsrhythmus des Verbrauches an Brennstoff und gesamter Primärenergie gezogen.

Hierbei wird festgestellt, daß sich der Anstiegrhythmus des Verbrauches an fossilen Brennstoffen verringert, und daß dieser Rhythmus für die gesamte Primärenergie konstant aufrecht erhalten werden muß.

Von diesen Erwägungen ausgehend, werden einige Schlußfolgerungen hinsichtlich der Entwicklung der Forschungsarbeiten für die Erweiterung der energetischen Grundlage und für die Erhöhung des Verwertungsgrades in der RVR gezogen.

BIBLIOGRAFIE

1. P. P. LAZAREV, *Energia şi resursele energetice.* Edit. tehnică, Bucureşti, 1962.
2. * * * *Annuaire Statistique O.N.U.*, New York, 1957.
3. E. MOSONYI, *Water Power Development.* I, Ed. Acad. de Ştiinţe R.P.U., 1957.
4. * * * *Energiequellen der Welt.* Archiv für Energiewirtschaft, 22 (1962).
5. PUTNAM, *The Energy in the Future.* New York, 1953.
6. * * * *Österreichische Energiebilanz für das Jahr 1959.* Ed. Kommissionsverlag des Österreichischen Staats, Wien, 1960.
7. * * * *Bilan énergétique de la Belgique.* Années 1951—1952. Extrait du „Bulletin de Statistique" 1954.
8. * * * *Possibilités d'échanges d'énergie électrique entre les pays de l'Europe Centrale et du Sud-Est de l'Europe.* EP/Document de Travail, *123*, 30 août (1957).
9. * * * *Actes de la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques*, I, Nations Unies, Genève, 1956, 40—52.
10. S. SAPHIER, *Metode sintetice de stabilire a necesarului de energie în perspectivă.* Energetica, **8**, 3 (1960).
11. F. CALLOT, *Les réserves mondiales d'énergie.* Annales des Mines, Mars (1962), 27—36.

ASPECTE ALE COMPARĂRII DIVERSELOR SISTEME DE TRANSPORT DE COMBUSTIBIL

DE

M. ELEFTERESCU, ŞT. KOVÁCS şi GH. TRANDAFIRESCU

620.98 : 656.2 : 662.62

Datorită dezvoltării cerinţelor economiei naţionale transportul de combustibil în ţara noastră a cunoscut, în ultima perioadă, o creştere accentuată, ajungîndu-se la situaţia ca transportul de combustibil să reprezinte o pondere însemnată în activitatea diverselor sisteme de transport, ca de exemplu, în activitatea căilor ferate, unde transportul de combustibil reprezintă mai mult de 25%. Paralel cu aceasta menţionăm că în costul combustibilului la consumator o pondere însemnată revine cheltuielilor de transport.

Avînd în vedere cele de mai sus, sînt deosebit de actuale studiile privind alegerea, pe baza unor criterii fundamentate din punct de vedere tehnico-economic, a celui mai adecvat sistem de transport (cale ferată, rutier, transport combinat cale ferată-rutier etc.) pentru o situaţie dată, ele conducînd la realizarea de însemnate reduceri ale cheltuielilor de transport în ansamblul economiei naţionale.

Criteriul cel mai frecvent utilizat pentru compararea sistemelor de transport de combustibil este criteriul cheltuielilor minime de exploatare în cazul în care comparaţia se referă la sisteme de transport existente şi criteriul cheltuielilor de calcul minime, în cazul în care cel puţin unul dintre sistemele de transport ce se compară necesită investiţii suplimentare.

În cele ce urmează, compararea diferitelor sisteme de transport se face luînd în considerare două ipoteze şi anume:

1. Capacitatea maximă a fiecărui sistem de transport ($N_{i\,max}$) asigură transportul cantităţii totale de combustibil (N_t) într-o perioadă de timp determinată, adică

$$N_{i\,max} \geqslant N_t.$$

2. Cantitatea de combustibil necesar a se transporta în perioada considerată este mai mare decît capacitatea de transport maximă a fiecărui sistem în parte, adică

$$N_{i\max} < N_t.$$

În ipotezele considerate se vor analiza diverse cazuri care apar frecvent în practica transportului de combustibil.

1. COMPARAREA DIVERSELOR SISTEME DE TRANSPORT ÎN IPOTEZA $N_{i\max} \geqslant N_t$

Pentru compararea diferitelor sisteme de transport în acest caz se foloseşte criteriul cheltuielilor minime de exploatare, deoarece sistemele de transport existente asigură, fiecare în parte, transportul întregii cantităţi de combustibil fără a necesita o creştere a capacităţii respective de transport şi deci nici investiţii suplimentare.

Considerînd pentru cheltuielile anuale totale de exploatare o expresie liniară de forma

$$K_i = A_i \cdot + B_i \cdot N_i \cdot d,$$

în care

i — indice ce caracterizează sistemul de transport;
A_i — cheltuielile de exploatare independente de volumul prestaţiei (lei/an);
B_i — cheltuieli de exploatare dependente de volumul prestaţiei (lei/t. km);
N_i — cantitatea de combustibil transportată (tone/an);
d — distanţa la care se efectuează transportul (km),

cheltuielile de exploatare pentru transportul unei tone de combustibil la distanţa d, vor fi

$$C_i = \frac{K_i}{N_i} = \frac{A_i}{N_i} + B_i \cdot d,$$

sau

$$C_i = \frac{A_i}{N_{i\max}} \cdot \frac{N_{i\max}}{N_i} + B_i \cdot d = \frac{A_i}{N_{i\max}} \cdot \frac{1}{\varphi} + B_i \cdot d,$$

unde $\varphi = \dfrac{N_i}{N_{i\max}}$ reprezintă coeficientul de încărcare al sistemului de transport considerat.

Notînd

$\dfrac{1}{\varphi} \cdot \dfrac{A_i}{N_{i\max}} = a_i$ — cheltuielile independente de distanţă, la o încărcare dată a sistemului de transport;

$B_i = b_i$ — cheltuielile proporţionale cu distanţa de transport,

cheltuielile pentru transportul unei tone de combustibil la distanţa d, vor fi

$$C_i = a_i + b_i \cdot d.$$

1.1. COMPARAREA A DOUĂ SISTEME DE TRANSPORT

Problema care apare este aceea de a preciza care dintre cele două sisteme de transport este cel mai indicat pentru a fi utilizat la efectuarea unui anumit transport la o distanță d.

Fie

$$C_i = a_i + b_i \cdot d,$$

$$C_j = a_j + b_j \cdot d,$$

expresiile cheltuielilor, corespunzătoare transportului unei tone la distanța d, pentru cele două sisteme i și j.

Sistemele ce se compară se ordonează în așa fel încît totdeauna să fie satisfăcută condiția $a_i < a_j$.

Cazuri posibile

$$\text{I} \quad b_i < b_j,$$

$$\text{II} \quad b_i = b_j,$$

$$\text{III} \quad b_i > b_j.$$

În cazurile I și II soluționarea problemei este evidentă în sensul că se utilizează sistemul de transport i întrucît totdeauna $C_i < C_j$.

În cazul III se determină o distanță l_{ij} pentru care cele două sisteme de transport sînt echivalente din punctul de vedere al cheltuielilor

$$l_{ij} = \frac{a_j - a_i}{b_i - b_j}.$$

În acest caz rezultă următoarele soluții:

— dacă $0 < d < l_{ij}$, $C_i < C_j$, deci este mai avantajos sistemul de transport i;

— dacă $d = l_{ij}$, $C_i = C_j$; din punctul de vedere al cheltuielilor este indiferent ce sistem se utilizează;

— dacă $d > l_{ij}$, $C_i > C_j$, deci este mai avantajos a se utiliza sistemul de transport j.

1.2. COMPARAREA MAI MULTOR SISTEME DE TRANSPORT

Considerăm expresiile cheltuielilor sistemelor respective de transport ca fiind de forma

$$C_1 = a_1 + b_1 \cdot d$$

$$C_2 = a_2 + b_2 \cdot d$$

$$\cdots\cdots\cdots$$

$$C_j = a_j + b_j \cdot d$$

$$\cdots\cdots\cdots$$

$$C_n = a_n + b_n \cdot d$$

şi ordonate astfel încît să fie satisfăcută condiţia

$$a_1 < a_2 < \ldots < a_j < \ldots < a_n.$$

Pentru alegerea unuia dintre sistemele considerate se construieşte o diagramă de forma celei din figura 1.

Se utilizează acel sistem de transport pentru care la distanţa d_x la care este necesar a se efectua transportul corespund cele mai mici cheltuieli C_x.

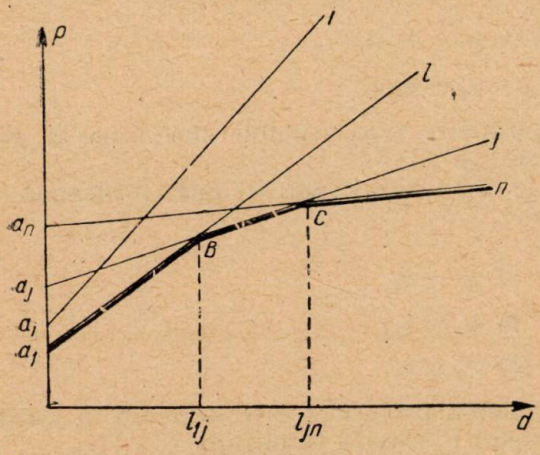


Fig. 1

Pentru a determina sistemul de transport cel mai avantajos corespunzător fiecărei lungimi a distanţei de transport, se porneşte cu mijlocul 1 ($a_1 < a_j$) pînă la prima intersecţie a acestei drepte cu o altă dreaptă j; se merge apoi pe dreapta j pînă la prima intersecţie a ei (pentru $d > l_{1j}$) cu o altă dreaptă ş.a.m.d., stabilindu-se astfel un contur $a_1, B, C, \ldots, n$ cu ajutorul căruia se poate determina sistemul de transport cel mai avantajos pentru fiecare distanţă d_x.

1. 3. CAZUL ÎN CARE PE O DISTANŢĂ DETERMINATĂ ESTE IMPUS UN ANUMIT MIJLOC DE TRANSPORT

Problema care apare în acest caz este aceea de a alege una dintre soluţiile posibile, anume de a efectua transportul pe toată distanţa d cu mijlocul de transport impus, sau de a utiliza şi cel de-al doilea mijloc de transport, efectuînd pentru aceasta transbordarea combustibilului dintr-un mijloc de transport în altul.

1.3.1 Situaţia în care distanţa l (pentru care există un mijloc impus de transport) se află la una din extremităţile distanţei totale de

Considerăm că mijlocul impus de transport este mijlocul 1; costul transportului în cele două soluţii posibile va fi

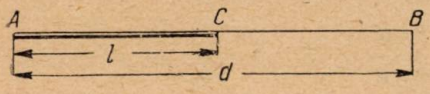


Fig. 2

— în cazul în care se utilizează mijlocul impus de transport pe întreaga distanţă d

$$C_1 = a_1 + b_1 \cdot d;$$

— în cazul în care se utilizează ambele mijloace de transport

$$C_2 = a_1 + b_1 l + a_2 + b_2 (d - l) + t,$$

în care t reprezintă costul operațiilor de transbordare pentru o tonă de combustibil.

Făcînd diferența celor două expresii rezultă

$$\Delta C = C_2 - C_1 = (b_2 - b_1)\, d - (b_2 - b_1)\, l + a_2 + t.$$

Cu notațiile

$$\alpha = \frac{t}{a_2} \qquad \alpha > 0,$$

$$\beta = \frac{b_2}{b_1} \qquad \beta > 0,$$

$$\delta = \frac{l}{d} \qquad 1 > \delta > 0,$$

relația de mai sus devine

$$\Delta C = \underbrace{a_2(1+\alpha)}_{A} - \underbrace{(1-\beta)(1-\delta)\, b_1 \cdot d}_{B}.$$

Se observă că totdeauna:

$$1 + \alpha > 0,$$

$$1 - \delta > 0,$$

deci semnul termenului B este dat de semnul parantezei $(1 - \beta)$.

Cazuri posibile:

I $b_1 \leqslant b_2$; rezultă $\Delta C > 0$ deoarece $(1 - \beta) \leqslant 0$, se utilizează mijlocul impus de transport pentru parcurgerea întregii distanțe d;

II $b_1 > b_2$; semnul și mărimea valorii ΔC va rezulta din compararea termenilor

$$A = a_2 (1 + \alpha) \text{ și}$$

$$B = (1 - \beta)(1 - \delta)\, b_1 \cdot d.$$

Dacă $A > B$ rezultă $\Delta C > 0$ deci se utilizează prima soluție, adică aceea de a utiliza mijlocul impus de transport, pentru întreaga distanță d.

Dacă $A = B$, rezultă $\Delta C = 0$ adică este indiferent care dintre cele două soluții posibile se utilizează.

Dacă $A < B$, rezultă $\Delta C < 0$ deci se utilizează a doua soluție, anume aceea de a folosi mijlocul impus de transport numai pe distanța l, pe restul distanței urmînd a fi folosit al doilea mijloc de transport.

Compararea celor două soluții poate fi efectuată și cu ajutorul nomogramei din figura 3.

Ordinea operațiilor de lucru în această nomogramă este cea indicată prin numere.

Pentru cazul concret al comparării sistemelor de transport rutier şi rutier + cale ferată, se poate utiliza diagrama din figura 4, care permite a se

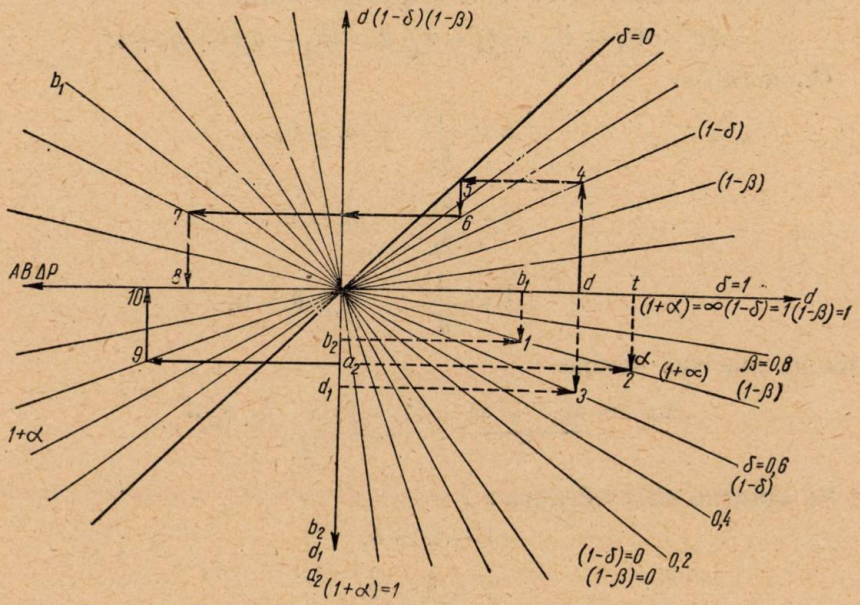


Fig. 3

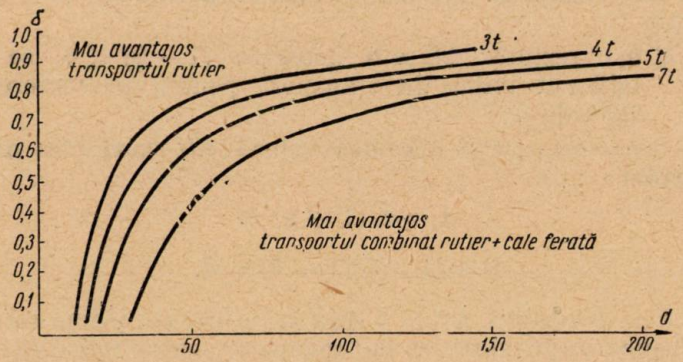


Fig. 4

preciza domeniile de utilizare a unuia dintre cele două sisteme menţionate în funcţie de distanţa la care se efectuează transportul şi de raportul δ.

1.3.2. Situaţia în care distaua l (pentru care există un mijloc impus de transport) nu se află la una din extremităţile distanţei totale d, ci undeva pe parcurs

Situaţia se analizează ca în cazul precedent, cu precizările următoare :

a — din punctul *A* se poate pleca cu oricare dintre cele două mijloace de transport luate în considerare şi, de asemenea, în punctul *B* se poate ajunge cu oricare dintre ele ;

b — trebuie să se ia în considerare necesitatea efectuării transbordării în punctele B_1 și B_2.

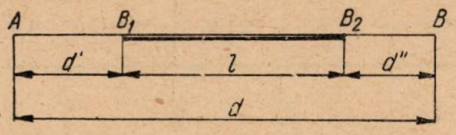


Fig. 5

Considerăm impus pe distanța *l* mijlocul 1 de transport.

Posibilitățile de transport vor fi în această situație următoarele:

— se va merge pe toate cele 3 distanțe (d', l, d'') cu mijlocul impus 1, adică vom avea succesiunea 1.1.1.;

— se va merge pe primele două distanțe (d', l) cu mijlocul impus 1, iar pe distanța d'' se utilizează mijlocul 2; transportul va necesita în acest caz o singură transbordare în punctul B_2; va exista succesiunea 1.1.2;

— pe prima distanță d' se utilizează mijlocul 2 de transport, iar pe următoarele (l, d'') mijlocul 1; va fi necesară o singură transbordare, în punctul B_1; vom avea deci succesiunea 2.1.1.;

— pe distanța d' se utilizează mijlocul 2 de transport, pe distanța l mijlocul 1 și din nou pe distanța d'' se utilizează mijlocul 2 de transport; în acest caz vor fi necesare două transbordări, în punctele B_1 și B_2; va exista succesiunea 2.1.2.

Notînd cu

$$k = \frac{l}{d}\,;\; k' = \frac{d'}{d}\,;\; k'' = \frac{d''}{d},$$

costul transportului în situațiile posibile va fi

$$C_{1.1.1.} = a_1 + b_1 d,$$
$$C_{1.1.2.} = (a_1 + a_2) + [(b_1 - b_2)(k + k') + b_2]\, d + t,$$
$$C_{2.1.1.} = (a_1 + a_2) + [(b_1 - b_2)(k + k'') + b_2]\, d + t,$$
$$C_{2.1.2.} = (a_1 + a_2) + [(b_1 - b_2)\, k + b_2]\, d + a_2 + t.$$

Comparînd două cîte două aceste posibilități de transport se obțin următoarele expresii:

$$A = C_{2.1.2.} - C_{1.1.1.} = 2\,(a_2 + t) - (b_1 - b_2)(k' + k'')\, d,$$
$$B = C_{2.1.2.} - C_{1.1.2.} = C_{2.1.1.} - C_{1.1.1.} = (a_2 + t) - (b_1 - b_2)\, k'\, d,$$
$$C = C_{2.1.2.} - C_{2.1.1.} = C_{1.1.2.} - C_{1.1.1} = (a_2 + t) - (b_1 - b_2)\, k''\, d,$$
$$D = C_{2.1.1.} - C_{1.1.2.} = (b_1 - b_2)(k'' - k')\, d.$$

Tabe

	$b_1 < b_2$				$b_1 = b_2$			
	1.1.1.	1.1.2.	2.1.1.	2.1.2.	1.1.1.	1.1.2.	2.1.1.	2.1.2.
1.1.1.		<	<	<		<	<	<
1.1.2.	>		$k' < k'' >$ $k' > k'' <$	<	>		0	<
2.1.1.	>	$k' < k'' <$ $k' > k'' >$		<	>	0		<
2.1.2.	>	>	>		>	>	>	

Rezultatele acestei comparări şi deci soluţionările problemei pentru diferite situaţii posibile sînt prezentate în tabelă.

Semnul $<$ arată că soluţia indicată pe linie este mai avantajoasă decît cea indicată pe coloană; semnul 0 arată că cele două soluţii sînt echivalente din punctul de vedere al cheltuielilor; semnul $>$ arată că soluţia menţionată pe linie este neeconomică faţă de cea menţionată pe coloană.

1.3.3. Situaţia în care la ambele extremităţi ale distanţei totale se impune utilizarea unui anumit mijloc de transport

Se consideră că mijlocul de transport impus pentru distanţele $l = k_1 d$ şi $m = k_2 d$ este mijlocul 1, pentru distanţa $d_0 = d - l - m = kd$, fiind posibil a se utiliza ambele mijloace.

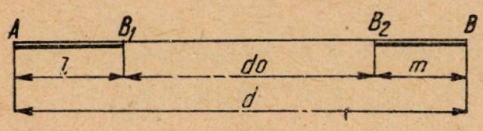


Fig. 6

Posibilităţile pentru efectuarea transportului în această situaţie sînt următoarele:

— se utilizează mijlocul impus de transport pe întreaga distanţă d;

— se utilizează mijlocul impus de transport numai pe distanţele l şi m, iar între aceste distanţe se utilizează un alt mijloc de transport, fiind necesare în acest scop două transporturi.

Costul transportului în cele două situaţii va fi

$$C_1 = a_1 + b_1 d,$$

$$C_2 = a_1 + b_1 k_1 d + t + a_2 + b_2(1 - k_1 - k_2) d + t + a_1 + b_1 k_2 d = 2 a_1 + a_2 + 2t + [b_1 (k_1 + k_2) + b_2 k] d.$$

lă

$b_1 > b_2$			
1.1.1.	1.1.2.	2.1.1.	2.1.2.
	$<$ pt. $C > 0$ $=$ pt. $C = 0$ $>$ pt. $C < 0$	$<$ pt. $B > 0$ $=$ pt. $B = 0$ $>$ pt. $B < 0$	$<$ pt. $A > 0$ $=$ pt. $A = 0$ $>$ pt. $A < 0$
$>$ pt. $C > 0$ $=$ pt. $C = 0$ $<$ pt. $C < 0$		$<$ pt. $D > 0$ $=$ pt. $D = 0$ $>$ pt. $D < 0$	$<$pt. $B > 0$ $=$pt. $B = 0$ $>$pt. $B < 0$
$>$ pt. $B > 0$ $=$ pt. $B = 0$ $<$ pt. $B < 0$	$>$ pt. $D > 0$ $=$ pt. $D = 0$ $<$ pt. $D < 0$		$<$ pt. $C > 0$ $=$ pt. $C = 0$ $>$ pt. $C < 0$
$>$ pt. $A > 0$ $=$ pt. $A = 0$ $<$ pt. $A < 0$	$>$ pt. $B > 0$ $=$ pt. $B = 0$ $<$ pt. $B < 0$	$>$ pt. $C > 0$ $=$ pt. $C = 0$ $<$ pt. $C < 0$	

Făcînd diferența acestor expresii se obține

$$\Delta C = C_2 - C_1 = a_1 + a_2 + 2t - (b_1 - b_2)\, k\, d.$$

Rezultă că în cazul în care $b_1 < b_2$ este totdeauna mai avantajos a se utiliza mijlocul 1 de transport pentru întreaga distanță d, iar în cazul în care $b_1 > b_2$ alegerea soluției va fi dictată de relațiile cantitative existente între termenii expresiei menționate.

În acest caz cele două posibilități de transport sînt echivalente din punctul de vedere al cheltuielilor dacă este satisfăcută condiția:

$$d_0 = kd = \frac{a_1 + a_2 + 2t}{b_1 - b_2} = d_{0E}.$$

Dacă $d_0 < d_{0E}$ este avantajoasă prima soluție, adică aceea de a se utiliza sistemul impus 1 de transport pentru întreaga distanță.

Dacă $d_0 > d_{0E}$ este avantajoasă cea de-a doua soluție, anume aceea de a se utiliza sistemul 1 de transport numai pe distanțele impuse $(l + d)$, pe distanța d_0 urmînd a se utiliza mijlocul 2, făcîndu-se pentru aceasta două transbordări.

1.3.4. Situația în care transportul între două centre se poate efectua pe rute diferite cu mijloace de transport impuse și diferite

Posibilitățile pentru efectuarea transportului între localitățile A și B vor fi în această situație următoarele:

— transportul se efectuează pe distanța cea mai scurtă D_1 cu mijlocul 1 de transport, caracterizat prin cheltuieli mai mari;

— transportul se efectuează pe distanța $D_2 > D_1$, cu mijlocul 2 de transport avînd cheltuieli mai mici.

Costul transportului în cele două situații va fi:

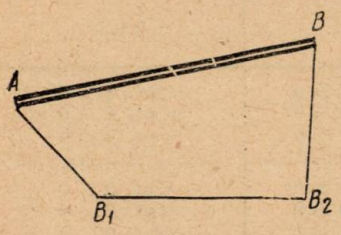


Fig. 7

$$C_1 = a_1 + b_1 D_1,$$
$$C_2 = a_2 + b_2 D_2.$$

Cele două soluții sînt echivalente din punctul de vedere al cheltuielilor în cazul în care între distanțele respective există relația

$$D_2 = \frac{a_1 - a_2}{b_2} + \frac{b_1}{b_2} D_1 = D_{2E}.$$

Pentru orice distanță $D_2 < D_{2E}$ este mai avantajos a se utiliza transportul cu mijlocul 2, deși se efectuează pe o rută mai lungă; pentru distanțele $D_2 > D_{2E}$ este mai avantajos a se utiliza mijlocul 1 de transport, pe distanța D_1.

2. COMPARAREA DIFERITELOR SISTEME DE TRANSPORT ÎN IPOTEZA $N_{i\max} < N_t$

În cazul în care un singur sistem de transport, de capacitate maximă $N_{i\max}$ nu poate asigura transportul întregii cantități de combustibil N_t, este necesar fie a se mări capacitatea de transport a celui mai avantajos sistem, făcîndu-se în acest scop investiții suplimentare, fie a se utiliza și un al doilea sistem de transport, existent, fără a fi necesare investiții suplimentare.

2.1. SITUAȚIA ÎN CARE UNUL DINTRE MIJLOACELE DE TRANSPORT CONSIDERATE NECESITĂ INVESTIȚII SUPLIMENTARE PENTRU SPORIREA CAPACITĂȚII DE TRANSPORT

Alegerea soluției în acest caz se face pe baza criteriului cheltuielilor de calcul minime.

Posibilitățile care se compară în această situație vor fi:

— transportul cantității N_t se efectuează cu mijloacele 1 + 2, mijlocul 1 de transport (mai ieftin) fiind utilizat la capacitatea sa maximă $N_{1\max}$, cantitatea $\Delta N = N_t - N_{1\max}$ fiind transportată cu mijlocul 2 de transport (mai scump), fără a se face investiții suplimentare;

— transportul cantității N_t se efectuează cu mijlocul 1 de transport, pentru transportul cantității ΔN mărindu-se corespunzător capacitatea de transport a acestui mijloc, fiind deci necesare investiții suplimentare.

Rezultă că problema se reduce la a compara transportul cantității de combustibil ΔN prin mijlocul 2, existent, cu transportul aceleiași cantități ΔN prin surplusul de capacitate al mijlocului 1, care urmează a se asigura prin investiții suplimentare.

Pentru realizarea creşterii capacităţii mijlocului 1 de transport vor fi necesare investiţiile totale

$$L = \alpha_1 + \beta_1 d,$$

α_1 fiind investiţiile suplimentare independente de distanţa pe care se efectuează transportul, iar β_1 partea de investiţii suplimentare dependentă de distanţă.

Considerînd că aceste investiţii nu se fac numai pentru transportul de combustibil, rezultă că în cheltuielile de calcul pentru transportul de combustibil trebuie a se lua în considerare numai o anumită cotă din investiţiile totale L şi anume

$$L_c = \lambda L$$

unde $0 < \lambda < 1$

Investiţia specifică pe tona de capacitate de transport va fi

$$I = \frac{L_c}{\Delta N} = \frac{\lambda}{\Delta N}(\alpha_1 + \beta_1 d).$$

Expresiile cheltuielilor de calcul pentru cele două soluţii care se compară vor fi

— pentru soluţia care prevede utilizarea unui mijloc de transport existent

$$K_2 = C_2 = a_2 + b_2 d;$$

— pentru soluţia ce necesită investiţii suplimentare

$$K_1 = \frac{1}{T_r} \cdot \frac{\lambda}{\Delta N}(\alpha_1 + \beta_1 d) + a_1 + b_1 d.$$

Cele două soluţii sînt echivalente pentru distanţa

$$d_e = \frac{\lambda\alpha_1 + (a_1 - a_2)\, T_r \cdot \Delta N}{\lambda\beta_1 + (b_1 - b_2)\, T_r \cdot \Delta N},$$

în care T_r reprezintă timpul de recuperare normat.

Pentru orice distanţă $d < d_e$ este economic a se utiliza pentru transportul cantităţii N_t sistemul de transport folosind mijloacele de transport 1 şi 2, fără a se face investiţii suplimentare; pentru cazul în care $d > d_e$ se utilizează mijlocul de transport 1, cu capacitate mărită prin investiţii suplimentare.

2.2. SITUAŢIA ÎN CARE SE UTILIZEAZĂ DOUĂ MIJLOACE DE TRANSPORT EXISTENTE

Această situaţie apare în cazul în care, după aplicarea criteriului cheltuielilor de calcul minime menţionat anterior, rezultă că este mai economic a se utiliza două mijloace de transport existente fără a se face

investiţii suplimentare pentru sporirea capacităţii de transport a mijlocului mai ieftin.

Problema care apare în acest caz este aceea de a determina modul în care este mai avantajos a utiliza cele două mijloace de transport.

Posibilităţile de a efectua transportul de combustibil în această situaţie sînt următoarele:

— utilizarea în paralel a ambelor mijloace de transport, pentru a se efectua transportul pe toată distanţa d;

— utilizarea unui sistem pe o anumită distanţă $d_1 < d$ urmînd ca în continuare transportul să fie efectuat cu cel de-al doilea sistem.

Se consideră că în ambele cazuri mijlocul 1 de transport, care este cel mai ieftin, este utilizat la maximum.

Notînd cu γ şi, respectiv $(1 - \gamma)$ ponderea cu care cele două mijloace intervin în transportul cantităţii N_t de combustibil, expresiile costului transportului unei tone de combustibil în cazurile menţionate, vor fi:

— în cazul utilizării în paralel a ambelor mijloace de transport

$$C_1 = \gamma (a_1 + b_1 d) + (1 - \gamma)(a_2 + b_2 d);$$

— în cazul utilizării mijloacelor de transport pe porţiuni deosebite

$$C_2 = a_1 + b_1 d_1 + a_2 + b_2 (d - d_1).$$

Făcînd diferenţa celor două expresii, rezultă

$$\Delta C = C_2 - C_1 = a_1 (1 - \gamma) + t + \gamma \cdot a_2 + (b_1 - b_2)(d_1 - \gamma d).$$

Avînd în vedere că

$$d \cdot N_{1\,\max} = d_1 N_t \text{ şi, de asemenea, } \frac{N_{1\,\max}}{N_t} = \gamma,$$

din care rezultă că $d_1 = \gamma d$, se obţine

$$\Delta C = a_1 (1 - \gamma) + t + \gamma a_2.$$

Întrucît $0 < \gamma < 1$ rezultă că totdeauna $\Delta C > 0$ adică este mai avantajos a se utiliza prima soluţie, anume aceea de a utiliza în paralel ambele mijloace de transport, pentru toată distanţa d, cu menţiunea de a utiliza la întreaga sa capacitate mijlocul 1 de transport.

★

Relaţiile stabilite în lucrarea de faţă sînt valabile pentru compararea variantelor de transport privind acelaşi fel de combustibil, variantele respective diferind între ele numai în ceea ce priveşte sistemele de transport ce se utilizează; în cazul în care se compară transportul unor combustibili de puteri calorifice diferite, în formulele indicate trebuie a se ţine seama şi de raportul între puterile calorifice ale combustibililor ce se transportă.

АСПЕКТЫ СРАВНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВКИ ТОПЛИВА

РЕЗЮМЕ

Благодаря тому, что развитие народного хозяйства требует значительного роста транспортировки топлива и что в стоимости топлива для потребителя значительная доля приходится на транспортные расходы, исследования в связи с выбором, на основе технически и экономически обоснованных критериев, наиболее подходящей системы транспортировки топлива являются особенно актуальными, поскольку они приводят к значительному снижению транспортных расходов в народном хозяйстве в целом.

В этом смысле, в работе рассматривается сопоставление различных систем транспортировки топлива, как в случае, когда каждая система может обеспечить транспортировку всего необходимого количества топлива, так и в случае, когда доставка всего количества топлива не может быть обеспечена одной только системой; в первом случае сопоставление делается на основе критерия минимальных эксплуатационных расходов, а во втором — на основе критерия минимальных расчетных расходов.

BIBLIOGRAFIE

1. G. Gheranimus, I. Scedrodarova, *Aplicarea metodei matematice în planificarea transporturilor.* Avtomobilnîi transport, **39**, *1* (1961).
2. R. Levi, *Recherche d'une répartition optima dans le transport avec ou sans escale.* Revue Générale des Chemins du Fer, **78**, *4* (1959).
3. C. Pirath, *Die Grundlagen der Verkehrswirtschaft.* Berlin, 1949.
4. H. Winkhaus, *Neue Transportwege in der europäischen Energieverteilung.* B.W.K., **12**, *6* (1960).
5. K. Kadas, *Matematikai modellek a közlekedési telyesitmények perspektiv alakulásának tudományos statistikai viszgálatára.* Epités és Közlekédestudományi Közlemények, **II**, *3* (1961).
6. C. Mihu, *Programarea liniară în transportul feroviar.* Revista de statistică, *10* (1959).
7. V. Florescu, *Principiile tarifelor de transport al mărfurilor în trafic feroviar şi trafic auto.* Probleme de preţ şi de preţ de cost, *1* (1962).

TIMPUL DE ÎNCĂLZIRE A BARELOR CILINDRICE PROFILATE

DE

Acad. AUREL AVRAMESCU

536 : 669 : 621.3.016.1

Procese de încălzire sau răcire rapidă a unor corpuri de forme variate intervin și au importanță în industria prelucrătoare de materiale metalice, ceramice, rășinoase etc. În funcție de masa, căldura specifică și numărul pieselor de încălzit, energiile necesare variază în limite largi și pot atinge valori considerabile. Atingerea unei anumite temperaturi în centrul geometric sau într-o anumită pătură a corpului fiind greu de controlat, aprecieri acoperitoare pot duce la pierderea inutilă de mari cantități de căldură. La răcirea bruscă a corpurilor, de exemplu în băi de călire sau în curenți de aer, după scoaterea lor din cuptoare, interesează de asemenea cît mai exact timpul în care o anumită pătură atinge o anumită temperatură. În astfel de cazuri pierderile de căldură intervin din cauza deficiențelor tratamentului termic și se manifestă prin creșterea deșeurilor sau a numărului de defecte în exploatare.

Cunoscînd cît mai exact desfășurarea în timp a proceselor termice tranzitorii, putem să evaluăm timpul de încălzire, respectiv răcire a unui corp, evitînd deficiențele ce apar din cauza conducerii necorespunzătoare a procesului termic.

Teoria analitică a conducției căldurii, fundată de Fourier și dezvoltată de numeroși mari fizicieni-matematicieni [1], a dat soluțiile multor probleme la limită de încălzire și răcire bruscă a unor corpuri de diferite forme [2]. Totuși aceste forme sînt relativ simple, iar la cele mai complexe calculele devin dificile [3]. Inginerii și tehnicienii din industrie au nevoie de criterii globale simple care pentru un anumit obiect, din material dat și de formă cunoscută, să indice timpul de încălzire la o anumită temperatură a unei anumite pături interioare, fără a face apel la calcule complicate.

În cele ce urmează se prezintă asemenea criterii utilizînd noțiunea constantei de timp [4] sau a timpului de încălzire respectiv de răcire și se dau formule simple pentru calculul fără dificultăți a acestui parametru. Cu această ocazie se adaugă la rezultatele cunoscute din literatura de specialitate [5], [6] cele din cercetări anterioare ale autorului [7], [8] cît și unele soluții inedite care ușurează orientarea în astfel de probleme.

Ceea ce caracterizează expresiile constantei de timp introduse de autor este simplitatea lor și apariția unor factori numerici întregi, a căror semnificație se încearcă a se elucida, fără pretenție de epuizare a acestei probleme.

De observat că procesele de încălzire și răcire tranzitorii nu sînt singurele dominate de ecuația diferențială a conducției căldurii, ci la ele se adaugă procese de difuzie moleculară, de osmoză, de mișcare browniană, de refularea cîmpului electromagnetic, de curenți Foucault și altele [8], care, avînd o bază teoretică similară, pot beneficia de rezultatele deduse pentru oricare din domeniile fenomenelor generale de difuzie.

TIMPUL DE ÎNCĂLZIRE ȘI RĂCIRE ÎN CENTRUL CORPURILOR SIMPLE

În lucrări anterioare [3], [4] autorul a demonstrat că toate fenomenele de difuzie sînt caracterizate de o constantă de timp, definită ca timpul mediu de atingere a temperaturii staționare într-un punct din interior, după aplicarea treptei unitare de temperatură pe întreaga suprafață exterioară. Pentru a caracteriza comportarea întregului corp, drept loc de „observație" se alege centrul geometric, axa sau planul de simetrie (v. anexa 1), dar nimic nu împiedică ca pentru considerații speciale să se aleagă un punct sau o pătură excentrică mai apropiată de suprafață. S-a demonstrat că acest parametru nu depinde de felul excitației exterioare, ci numai de factorii interni ai corpului, în speță de constanta de difuzie a, denumită și difuzivitate, și la corpuri geometrice simple de una din dimensiunile principale (R) ale corpului respectiv [9]. Difuzivitatea este raportul conductivității termice la căldura specifică la volum constant c_v,

$$a = \frac{\lambda}{c_v} = \frac{\lambda}{\gamma c_p}, \tag{1}$$

unde γ este densitatea și c_p căldura specifică la presiune constantă (cea mai des întrebuințată în tehnică).

Pentru o placă infinită de semigrosime R, un cilindru circular cu raza R și o sferă de aceeași rază, constanta de timp astfel definită are în planul, axa de simetrie, respectiv punctul central valorile

$$T_p = \frac{R^2}{2a}, \qquad T_c = \frac{R^2}{4a}, \qquad T_s = \frac{R^2}{6a}, \tag{2}$$

care se raportează ca numerele întregi 1 : 2 : 3, adică tocmai gradele de libertate ale celor trei corpuri geometrice simple.

După trecerea unei constante de timp T temperatura nu scade exact la valoarea $1/e = 0{,}36788$ ca în cazul curbei exponențiale, dar după $3T$ ea se apropie ca aceasta, cu o abatere de cel mult $\pm 5\%$, de valoarea sa staționară, iar după $4T$ abaterea este cel mult $\pm 2\%$ din valoarea inițială [4]. Astfel pentru orice necesitate practică, inginerească, noua constantă de timp se poate utiliza similar ca cea cunoscută de la curba exponențială, beneficiind în același timp din plin de formulele foarte simple (2).

Conform unei recomandări CEI privind aparatele de măsură [10], o definiție identică se aplică *timpului de răspuns* al sistemului de măsură. De aceea este justificat a se numi constanta de timp nouă *timpul de încălzire* respectiv *de răcire*, valoric egale între ele, deoarece în condiții de conservarea stării de agregare, teoretic răcirea și încălzirea urmează aceleași legi.

Cunoașterea timpului de încălzire-răcire pentru cele trei corpuri geometrice simple nu este, desigur, suficientă spre a putea calcula acest parametru în cazul profilelor și corpurilor de forme variate, ce intervin în practică. De aceea, este necesar să se deducă valoarea acestei constante de timp pentru cît mai multe forme simple și complexe de corpuri.

Calculul constantei de timp se poate efectua pe mai multe căi, din care amintim:

a) Obținerea soluției generale a cîmpului de temperatură prin integrarea ecuației diferențiale a căldurii în condițiile unui șoc termic (de răcire) exterior și apoi integrarea în timp a variației (descendente) a temperaturii (v. anexa 1).

b) Deducerea din derivata funcției de transfer, fără integrarea ecuației diferențiale [9], conform formulei

$$T = \lim_{s \to 0} \frac{1}{s} [1 - Y(s)] = - Y_s'(0). \tag{3}$$

Funcția de transfer $Y(s)$ este (conform STAS 6019—61) transformata Laplace a răspunsului sistemului la un impuls unitar $\delta(t)$ de tip Dirac.

c) Calculul din rădăcinile funcției caracteristice după formula dedusă de M. Leon [11]

$$T = \lim_{s \to 0} \frac{\partial}{\partial s} \ln Y(s) = \sum_{n=1}^{\nu} \frac{1}{s_n} - \sum_{m=1}^{\mu} \frac{1}{s_m}, \tag{4}$$

unde s_n și s_m sînt cele ν respectiv μ rădăcini ale numitorului respectiv numărătorului funcției de transfer.

Bineînțeles că alegerea metodei de calcul depinde de disponibilitatea soluțiilor sau datelor necesare cît și de convenienta calculelor.

Bara pătrată a fost studiată și se cunoaște soluția clasică tip Fourier a cîmpului de temperatură după o răcire bruscă a suprafeței [13]. Ea se obține din înmulțirea a două soluții valabile pentru două plăci infinite de grosimea $2R$ dispuse perpendicular (v. anexa 2). Constanta de timp re-

zultă din integrarea (prevăzută la punctul *a*) de mai sus) în raport cu timpul

$$T_{pt} = \frac{R^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{n+m} \frac{2^2}{\mu_n \mu_m} \frac{1}{\mu_n^2 + \mu_m^2}, \tag{5}$$

unde $\mu_n = (2n - 1)\,\pi/2$.

Dubla sumă $S_{n,m}$ se poate calcula după cum se arată în anexa 2, rezultînd timpul de răcire respectiv încălzire

$$T_{pt} = \frac{3R^2}{10a} = \frac{6}{5} \cdot \frac{R^2}{4a} = \frac{6}{5} T_c, \tag{6}$$

o valoare cu 20% mai mare decît la cilindrul rotund de rază R înscris în pătrat. Raza unui cilindru care să aibă aceeaşi constantă de timp cu un pătrat trebuie să fie cu 10% mai mare decît semilatura pătratului.

O explicaţie a acestui rezultat se poate da pe mai multe căi. Fluxul de căldură are de parcurs raze mai lungi pînă la latura exterioară $2R$ a pătratului decît pe cercul cu rază R şi anume dintr-o integrare (v. anexa 3) reiese că distanţa medie aritmetică este cu 13,1%, iar cea geometrică cu 12,74% mai mare decît raza cercului. În acelaşi timp perimetrul la pătrat este în raportul $4/\pi$ mai mare decît a cercului. Deci raportul distanţelor medii la centru şi a perimetrelor dau o indicaţie calitativă, dar nu şi cantitativă asupra creşterii constantei de timp.

Suprafaţa cercului cu rază $1{,}1R$ fiind $S_o = \pi \cdot 1{,}21\ R^2$, iar a pătratului circumscris $S_\square = 4R^2$, rezultă că raportul secţiunilor este de $S_\square/S_o = 1{,}05$, deci cu 5% mai mare la pătrat faţă de cercul cu aceeaşi constantă de timp.

Pentru aprecieri aproximative un pătrat se poate aproxima cu cercul de aceeaşi secţiune, ceea ce este avantajos dată fiind simplitatea formulei (2) din care se obţine astfel constanta de timp corespunzătoare.

Bara dreptunghiulară nu se poate calcula atît de simplu, deoarece laturile $2R_1$ şi $2R_2$ intră implicit în formula (2.5) din anexa 2. Un calcul exact rămîne să se facă cu ajutorul unei maşini cifrice de calcul. Se pot da totuşi indicaţii pentru calcule practice aproximative.

TIMPUL DE ÎNCĂLZIRE ŞI RĂCIRE ÎN INTERIORUL BARELOR

Autorul a arătat [7] că dacă axa se deplasează din centrul de simetrie al secţiunii, constanta de timp respectiv timpul de încălzire se poate obţine printr-o extindere a formulelor (2). În speţă pentru un plan la distanţa x de la planul median al plăcii avem

$$T_{px} = \frac{R^2 - x^2}{2a}, \tag{7}$$

iar pentru o axă excentrică într-un cilindru rotund

$$T_{cr} = \frac{R^2 - r^2}{4a}, \tag{8}$$

$r < R$ fiind distanţa la axa de simetrie în secţiune.

În interiorul unei bare pătrate relaţiile nu mai rămîn atît de simple. Pentru distanţe nu prea mari de la planul sau axa de simetrie se pot utiliza formulele (7) respectiv (8) de mai sus dacă raza cilindrului echivalent se alege conform relaţiei (6).

INDICAŢII PENTRU CALCULELE APROXIMATIVE

În cele de mai sus s-a arătat că, dacă exactitatea care se cere nu este prea mare, se pot utiliza formule foarte simple, respectiv da indicaţii pentru echivalarea cu profilul rotund.

Bara dreptunghiulară se poate aproxima dacă, examinînd formula (2.4) din anexa 2, deducem o regulă aproximativă pentru timpul de răcire şi încălzire.

Într-adevăr constanta de timp a barei dreptunghiulare cu laturile $2X$, $2Y$ se poate deduce aproximativ prin compunerea din constantele de timp ale plăcilor infinite respective aplicînd formula de legare în paralel a rezistenţelor

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_x} + \frac{1}{T_y} = \frac{2a}{X^2} + \frac{2a}{Y^2}. \tag{9}$$

În cazul pătratului, $X = Y$ şi obţinem

$$T_{pt} = \frac{X^2}{4a} = T_c = \frac{R^2}{4a}. \tag{10}$$

Formula (9) se poate verifica şi prin trecerea la limită $Y \to \infty$ care dă just constanta de timp a plăcii infinite de grosimea $2X$.

Deci pentru calcule aproximative se pot aplica formulele (9) şi (10) care dau timpul de răcire şi încălzire a barelor dreptunghiulare.

Profilele complexe se pot analiza din punctul de vedere al timpului de încălzire al miezului respectiv, deci al axelor şi planurilor de simetrie, făcînd uz de echivalarea părţilor profilului cu corpuri simple a căror constantă de timp se cunoaşte.

Astfel, un profil de şină de cale ferată se poate descompune aproximativ într-un dreptunghi sau placă de bază, un dreptunghi al piciorului şi un cilindru rotund de o rază covenabilă care să înlocuiască profilul complicat al îngroşării superioare. Este evident că încălzirea şi răcirea părţilor subţiri interesează mai puţin decît a celor mai groase.

Metoda s-a aplicat cu succes în unele cazuri practice, din care amintim numai unul. La călirea unui izolator de suspensie din sticlă compus dintr-un bulb sferic gol la care se ataşează un taler cilindric de grosime

egală cu grosimea bulbului, s-a observat fisurarea consecutivă a izolatorului în zona de trecere de la bulb la taler. Un calcul simplu al timpilor de răcire a arătat că bulbul la aceeași grosime trebuie răcit de trei ori mai intens decît talerul. Dispunînd suflajul după această indicație, s-au redus considerabil deșeurile.

Calculul efectiv al timpului de răcire și încălzire a unui corp, presupune cunoașterea valorii difuzivității termice $a = \lambda / \gamma c$. Există tabele [2], [14] pentru acest parametru, dar el se poate ușor calcula din valorile mărimilor λ, γ, c (conductivitatea termică, densitatea și căldura specifică), care îl compun.

Valoarea a variază cu temperatura, dar mult mai puțin decît alte proprietăți, din cauză că atît conductibilitatea termică λ cît și căldura specifică c variază puțin cu temperatura. Mai defavorabil este că pentru metale conductivitatea termică scade cu temperatura iar c crește. Cu toate acestea pentru majoritatea corpurilor a se poate calcula cu o valoare medie constantă în domeniul de temperatură considerat. Această medie se calculează cu ajutorul formulei propuse de Nusselt

$$\bar{a} = \frac{1}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} a(\vartheta)\, d\vartheta. \tag{11}$$

O precauție se impune la oțel din cauza variației discontinui a căldurii specifice în punctul Curie. Formula (11) dă posibilitatea de a se stabili și în acest caz valoarea medie cea mai apropiată de realitate a difuzivității termice.

Ținînd seama de aceste indicații nimic nu împiedică de a aplica pe o scară largă stabilirea prealabilă a timpului de răcire și încălzire a barelor profilate.

ANEXA 1

Definiția constantei de timp

Dacă într-un corp omogen și izotrop în care este valabilă ecuația conducției căldurii sub forma generalizată

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{k}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right), \tag{1.1}$$

unde

$$k = \begin{cases} 0 \\ 1 \\ 2 \end{cases} \quad \text{pt.} \quad \begin{cases} \text{placă} \\ \text{cilindru circular} \\ \text{sferă} \end{cases}$$

cu condițiile inițiale și la limită

$$u(R) = 1 \qquad t < 0 \tag{1.2}$$

$$u(R) = 0 \qquad t > 0 \tag{1.3}$$

$$\frac{\partial u(0, t)}{\partial r} = 0 \qquad t > 0, \tag{1.4}$$

se cunoaşte variaţia temperaturii $u(r, t)$, adică soluţia problemei la limită pentru un loc oarecare interior caracterizat prin coordonata r_1, atunci se defineşte constantă de timp mărimea

$$T = \frac{1}{u(r_1, 0)} \int_0^\infty u(r_1, t)\, dt. \tag{1.5}$$

În cazul cînd locul este originea coordonatelor $r_1 = 0$, atunci

$$T_0 = \frac{1}{u(0, 0)} \int_0^\infty u(0, t)\, dt, \tag{1.6}$$

caracterizează comportarea întregului corp faţă de şocuri termice exercitate pe suprafaţa exterioară $r = R$ a corpului.

ANEXA 2

Calculul constantei de timp în axa barei pătrate

Ecuaţia diferenţială a căldurii

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right], \tag{2.1}$$

are în dreptunghiul $2R_1$, $2R_2$ pentru condiţiile

$$\begin{aligned} &u(x, y, t) = 1, && t < 0 \\ &u(\pm R_1 \pm R_2) = 0, && t > 0 \\ &u'_{x,y}(0, 0) = 0, \end{aligned} \tag{2.2}$$

soluţia [2]

$$u(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} A_n A_m \cos \mu_n \frac{x}{R_1} \cos \mu_m \frac{y}{R_2} \times \exp\left[-\left(\mu_n^2 \frac{R^2}{R_1^2} + \mu_m^2 \frac{R^2}{R_2^2}\right) \mathrm{Fo}\right], \tag{2.3}$$

unde

$$\mathrm{Fo} = \frac{at}{R^2}, \quad 1/R^2 = 1/R_1^2 + 1/R_2^2, \quad A_{n,m} = (-1)^{n,m} \frac{2}{\mu_{n,m}}.$$

În axa dreptunghiului $x = y = 0$ temperatura scade după funcţia

$$u(0, 0, t) = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} A_n A_m \exp\left[-\left(\mu_n^2 \frac{R^2}{R_1^2} + \mu_m^2 \frac{R^2}{R_2^2}\right) \mathrm{Fo}\right], \tag{2.4}$$

a cărei integrală este prin definiţie constanta de timp

$$\int_0^\infty u(0, 0, t)\, dt = T = \frac{1}{a} \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{n+m} \frac{2^2}{\mu_n \mu_m} \frac{R_1^2 R_2^2}{R_2^2 \mu_n^2 + R_1^2 \mu_m^2}. \tag{2.5}$$

În cazul pătratului $R_1 = R_2 = R$

$$\int_0^\infty u(0, 0, t)\, dt = T_0 = \frac{R^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{n+m} \frac{4}{\mu_n \mu_m} \frac{1}{\mu_n^2 + \mu_m^2} = \frac{R^2}{a} S_{mn} \tag{2.6}$$

(v. relaţia (5) din lucrare).

Sumele infinite nu se găsesc în literatură. Ele se pot calcula numeric după schema înmulţirii seriilor [12] dacă se separă termenii (pozitivi) pentru care $n = m$ şi $m + n = 2n$. Restul de termeni alternează în semne după cum $m + n$ este par sau impar. Contribuţia acestora (întotdeauna negativă) se poate evalua dintr-un număr redus de termeni, deoarece pentru numere n sau m mari ele se anulează reciproc.

Deci se poate scrie

$$S_{m,n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^4} - R_{n,m}. \tag{2.7}$$

Prima sumă a fost calculată de Euler [12]

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^4} = \frac{2 \cdot 2^4}{\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^4} = \frac{2 \cdot 2^4}{\pi^4} \frac{\pi^4}{96} = \frac{1}{3}. \tag{2.8}$$

Restul

$$R_{n,\nu} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\nu=1}^{n} \frac{(-1)^{2\nu-1}}{\mu_\nu^3 \mu_{n-\nu} + \mu_\nu \mu_{n-\nu}^3} \tag{2.9}$$

a fost calculat de autor şi este

$$R_{n,m} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 2^4}{\pi^4} \cdot \frac{3}{10^2} \frac{\pi^4}{8 \cdot 16} = \frac{3}{100}, \tag{2.10}$$

iar (2.7)

$$S_{n,m} = \frac{1}{3} - \frac{3}{100} = \frac{3}{10}, \tag{2.11}$$

astfel că valoarea constantei de timp rezultă din relaţia (6).

ANEXA 3

Distanţa medie de la perimetru la centru pentru cerc şi pătrat

Din cauza simetriei este suficient să se compare latura unui triunghi dreptunghi isoscel de catetă $R = 1$ cu un arc de cerc de unghi central $\pi/4$ şi rază $R = 1$ (optime de cerc).

Distanţa medie aritmetică

Pentru cerc $r = R = 1$.

Pentru pătrat după regula lui Pitagora

$$r_a = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/4} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}\, d\alpha = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/4} \frac{d\alpha}{\cos \alpha} = \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2} \right) \Bigg|_0^{\pi/4} =$$

$$= \frac{4}{\pi} \ln \operatorname{tg} \frac{3\pi}{8} = \frac{4}{\pi} \cdot 0{,}887 = 1{,}131,$$

deci cu 13,1% mai mare ca la cerc.

Distanța medie geometrică

Pentru pătrat

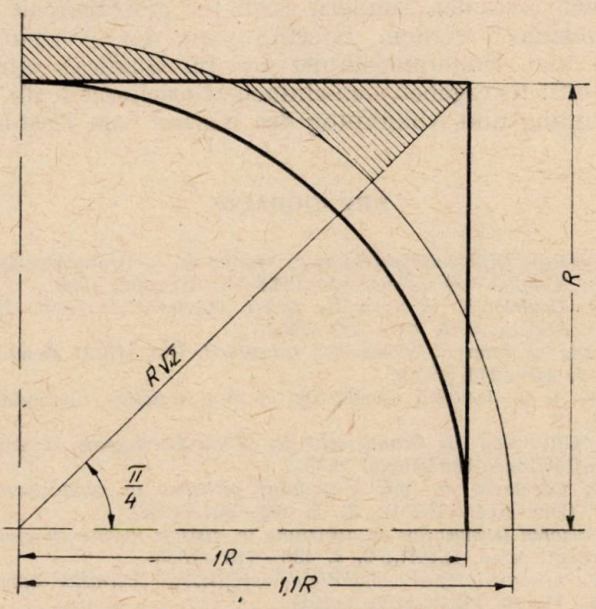


Fig. 1. Relații geometrice între pătrat și cerc de egale constante de timp.

$$r = \sqrt{\frac{4}{\pi}\int_0^{\pi/4}(1+\operatorname{tg}^2\alpha)\,d\alpha} = \sqrt{\frac{4}{\pi}\int_0^{\pi/4}\frac{d\alpha}{\cos^2\alpha}} = \sqrt{\frac{4}{\pi}\operatorname{tg}\alpha\Big|_0^{\frac{\pi}{4}}} = \frac{4}{\pi} = 1{,}1274,$$

deci cu 12,74% mai mare decît la cerc.

Perimetrul

Pentru optimea de cerc perimetrul este $\pi/4$.

Pentru a opta parte a pătratului perimetrul este $p_p = 1$.

Raportul distanței medii la perimetru este

pentru cerc: $x_c = \frac{r_a}{p} = \frac{4R}{\pi} = \frac{4}{\pi} = 1{,}274$; pentru pătrat: $x_p = \frac{r_a}{p} = \frac{1{,}131}{R} = 1{,}131.$

DIE ERWÄRMUNGSDAUER ZYLINDRISCHER PROFILSTÄBE

ZUSAMMENFASSUNG

Die Erwärmungsdauer der Kerne von zylindrischen Profilkörpern, die in Umgebungen hoher Temperatur eingeführt oder Wärmestößen ausgesetzt werden, muß bekannt sein, um bei den industriellen Erwär-

mung- und Abkühlvorgängen Zeit und Kraft zu sparen. Die flächenmäßig definierte Ansprechzeit in der Achse des Körpers nach einem Einheitssprung der Temperatur auf der Außenfläche kann nicht nur für einen runden Zylinder, sondern auch für gewöhnliche einfache Profile genau berechnet werden. Hierfür wird das Verhältnis zwischen dem Quadrat- und Rundquerschnitt des im Quadrat eingeschriebenen Kreises aufgestellt. Es ergeben sich einfache Beziehungen für die Abschätzung der Erwärmung und Abkühlung des Kernes von Profilstäben.

BIBLIOGRAFIE

1. B. RIEMANN, *Partielle Differentialgleichungen*. Vieweg & S. Braunschweig, 1938.
2. А. В. ЛЫКОВ, *Теория теплопередачи*. ГИТТЛ, Москва, 1952.
3. A. AVRAMESCU, *Contribuţii la calculul răcirii blocurilor de beton*. Bul. ştiinţ. Acad. R.P.R. Secţ. 1, **6**, *2*, 407—422 (1954).
4. — *Constanta de timp a fenomenelor tranzitorii*. Bul. ştiinţ. Acad. R.P.R. Secţ. 3, *4*, *3—4*, 241—248 (1952).
5. H. S. CARSLAW, I. C. JAEGER, *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, Oxford, 1948.
6. GRÖBER, ERK, GRIGULL, *Die Grundgesetze der Wärmeübertragung*. 3. Aufl., V. Springer, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1955.
7. A. AVRAMESCU, *Constanta de timp a efectului pelicular în conductoare cilindrice şi tubulare*. Com. Acad. R.P.R., **8**, *3*, 295—304 (1958).
8. — *Caracterizarea fenomenelor de difuziune în sisteme închise cu ajutorul constantei de timp*. Com. Acad. R.P.R., **9**, *5*, 433—443 (1958).
9. — *Un nou criteriu integral cumulativ de optimizarea sistemelor automate*. Com. Acad. R.P.R., **11**, *10*, 1181—1193 (1961).
10. * * * *CEI—CT 42*: *Recommandations pour la technique des essais à haute tension*. 42 (Secr.), *7*, p. 32, fig. 13.
11. A. AVRAMESCU, M. LEON, *Noi criterii pentru caracterizarea comportării la transfer a sistemelor automate*, în *„Probleme de automatizare"* **III**, Ed. Acad. R.P.R., Buc., 5—25 (1961).
12. K. KNOPP, *Theorie und Anwendung der unendlichen Reihen*. *I*. Springer, Berlin, p. 232 (1922).
13. ER. BERGER, *Über die Berechnung des Temperaturverlaufs in einem Rechtkant beim Abkühlen und Erwärmung*. Z. angew. Math. u. Mech., **8**, *6*, 479 (1928).
14. LANDOLT-BÖRNSTEIN, *Physikalisch-Chemische Tabellen*. *Thermische Eigenschaften der Materie*. Springer V., Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1959.

CONTRIBUȚII LA TEORIA MOTORULUI ASINCRON CU CILINDRU DE ETANȘARE ÎN ÎNTREFIER

DE

AUGUSTIN MORARU

621.313.333.2.016.1.001.24

La pomparea lichidelor corosive sau la presiuni mari, în industria chimică se folosește cu mult succes motorul asincron cu cilindru de etanșare în întrefier [1], [2]. Aceste motoare se pot folosi și pentru acționarea pompelor submersibile [3].

În principiu, motorul cu cilindru de etanșare în întrefier este un motor asincron obișnuit, cu întrefier mare, în care se introduce un cilindru metalic (fig. 1), servind la etanșarea statorului. Lichidul pompat are în general acces la rotor, din care cauză acesta se execută din materiale necorodabile sau este acoperit cu un strat protector. Această construcție a motorului permite eliminarea garniturilor de etanșare la ax, care pe lîngă că pot produce pierderi de energie foarte importante la pomparea lichidelor sub presiune mare și se uzează repede, nici nu asigură o etanșare perfectă, iar pătrunderea lichidelor la bobinajul statoric al motorului duce la scoaterea din funcție a acestuia.

Deși acest tip de motor este cunoscut de mult timp, pînă în prezent nu s-a răspîndit decît la acționarea pompelor submersibile [3]. În ultimul timp a început să se folosească tot mai mult în industria chimică [1], [2].

În legătură cu funcționarea acestor motoare, se ridică problema modului în care sînt influențate caracteristicile de funcționare ale motorului asincron prin prezența cilindrului de etanșare în întrefier. În acest cilindru, construit de obicei din materiale nemagnetice cu rezistivitate mare, se induc curenți turbionari care micșorează cîmpul din întrefier și produc pierderi importante de energie. De obicei, la proiectarea acestor motoare nu se ține seama de reacția curenților din cilindru asupra cîmpului, ci se calculează numai pierderile dezvoltate în cilindru [3]. Acest mod simplist de a judeca lucrurile nu este motivat și în unele cazuri poate duce la concluzii eronate.

Deosebirile dintre teoria mai exactă dezvoltată aici şi teoria simplistă sînt cu atît mai mari, cu cît este mai gros cilindrul de etanşare, iar în ultimul timp se tinde spre realizarea unor motoare avînd cilindru de etanşare de 10—20 mm grosime (pentru presiuni pînă la 500 kgf/cm^2 [1]).

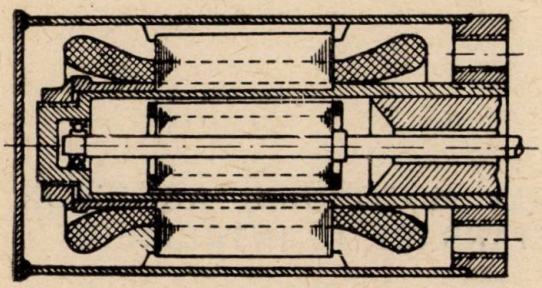


Fig. 1. — Secţiune longitudinală prin motorul asincron cu cilindru de etanşare în întrefier.

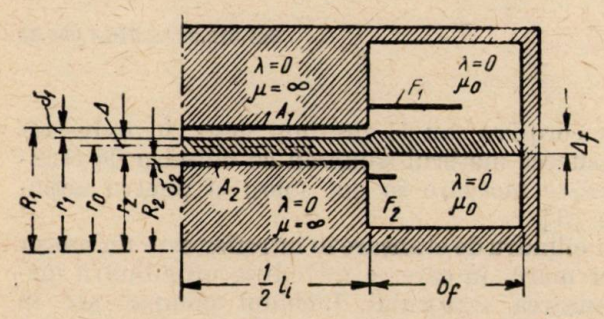


Fig. 2. — Schematizarea motorului cu cilindru de etanşare în întrefier.

Pentru a elucida principalele fenomene care au loc în cilindrul de etanşare, studiul se conduce în prima aproximaţie considerînd armăturile netede şi neglijînd armonicile spaţiale ale cîmpului din întrefier. Efectul prezenţei cilindrului asupra armonicilor cîmpului se poate evalua ulterior şi se manifestă mai ales sub forma apariţiei unor pierderi suplimentare în cilindru şi prin micşorarea fluxurilor de scăpări diferenţiale (datorită reacţiei curenţilor din cilindru).

Rezolvarea problemei propuse necesită integrarea ecuaţiilor cîmpului electromagnetic (neglijînd curenţii de deplasare) în interiorul maşinii, în regim armonic (în timp şi în spaţiu). Interiorul maşinii se poate schematiza ca în figura 2, bobinajele fiind înlocuite cu pînze de curenţi la suprafeţele dinspre întrefier ale armăturilor (A_1, A_2) şi la capetele de bobină (F_1, F_2), armăturile se consideră de permeabilitate infinită şi conductibilitate nulă, iar cilindrul de etanşare de grosime Δ, este separat de armături prin spaţii de aer de grosime δ_1 şi δ_2; în afara întrefierului cilindrul de etanşare poate avea o grosime mai mare Δ_f. La suprafeţele armăturilor, pînzele de curent au numai componentă axială. Chiar dacă s-ar putea rezolva problema formulată în toată generalitatea de mai sus, rezultatele obţinute ar fi practic inutilizabile, datorită complexităţii for-

mulelor respective. De aceea, separăm problema generală în două mai simple, introducînd și anumite aproximații: *a*) se calculează cîmpul în întrefier și în cilindru, neglijînd efectul de margine și *b*) se ține seama de efectul de margine printr-un coeficient de corecție calculat în ipoteza unui cilindru de grosime foarte mică, de exemplu conform [4].

Problema *a*) este cilindrică și plană (nu depinde de coordonata axială). Se alege deci un sistem de coordonate cilindric drept r, φ, z, cu axa z în axul mașinii (fig. 2). Întrucît se studiază un regim sinusoidal în timp și spațiu, componentele mărimilor de cîmp se pot reprezenta sub forma complexă

$$V(r, \varphi, z, t) \to \dot{V}(r)\, e^{j(\omega t - p\varphi)}, \tag{1}$$

ω fiind pulsația mărimilor, iar p numărul de perechi de poli (spațiali) ai cîmpului din întrefier.

Trebuie integrat deci următorul sistem al ecuațiilor cîmpului electromagnetic

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \lambda \vec{E}; \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial (\mu \vec{H})}{\partial t}, \tag{2}$$

$$\operatorname{div} (\mu \vec{H}) = 0; \quad \operatorname{div} (\varepsilon \vec{E}) = 0,$$

domeniul de integrare fiind delimitat de armăturile mașinii.

Considerînd $\mu = \text{const.}$, $\varepsilon = \text{const.}$, $\lambda = \text{const.}$, oricare dintre mărimile de cîmp trebuie să satisfacă ecuația diferențială

$$\vec{\nabla}^2 V = \lambda \mu \frac{\partial V}{\partial t}. \tag{3}$$

Efectuînd calculele în coordonate cilindrice și ținînd seama de (1), rezultă ecuația

$$\frac{d^2 \dot{V}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{V}}{dr} - \left(\frac{p^2}{r^2} + j \mu \omega \lambda \right) \dot{V} = 0. \tag{4}$$

Aceasta este o ecuație Bessel [5], [6] de argument complex și ordin p. Soluția acestei ecuații s-ar putea exprima cu ajutorul funcțiilor Thomson generalizate [5], de argument real și ordin p sau cu ajutorul funcțiilor Bessel modificate de argument complex $\left(\text{faza egală cu } \frac{\pi}{4} \right)$ și ordin p. Pentru ușurarea calculelor se va utiliza ultima exprimare. Notînd

$$\zeta = r \sqrt{j \mu \omega \lambda}. \tag{5}$$

soluția se exprimă prin funcțiile Bessel modificate de prima și a doua speță

$$\dot{V} = \dot{C}_1 I_p(\zeta) + C_2 K_p(\zeta), \tag{6}$$

C_1 și C_2 fiind constante de integrare.

Ţinînd seama de relaţiile (2), se deduc următoarele soluţii ale mărimilor de cîmp (pe componente):

$$\left.\begin{aligned} \dot{E}_r &= \dot{E}_\varphi = \dot{H}_z = 0, \\ \dot{E}_z &= \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\lambda}}\,[\dot{C}_1 I_p(\zeta) + \dot{C}_2 K_p(\zeta)], \\ \dot{H}_r &= j\frac{p}{\zeta}\,[\dot{C}_1 I_p(\zeta) + C_2 K_p(\zeta)], \\ \dot{H}_\varphi &= C_1 I'_p(\zeta) + C_2 K'_p(\zeta), \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

în care $I'_p(\zeta)$ şi $K'_p(\zeta)$ sînt derivatele în raport cu ζ a funcţiilor Bessel modificate $I_p(\zeta)$ şi $K_p(\zeta)$.

Pentru uşurarea calculelor şi a reprezentărilor este indicat ca înainte de a pune condiţiile de frontieră, să se treacă de la mărimile de cîmp $\dot{H}_r$ şi $\dot{H}_\varphi$ la tensiunile $\dot{U}$ şi la curenţii $\dot{J}$ care sînt echivalenţi cu aceste mărimi de cîmp din punctul de vedere al interacţiunii cu înfăşurările statorice şi rotorice ale maşinii. Relaţiile de legătură corespunzătoare se stabilesc cu ajutorul legii inducţiei electromagnetice şi a legii circuitului magnetic, aplicate la suprafeţele frontieră, care se consideră mărginite spre exterior de fier ($\mu = \infty$). Rezultă

$$\left.\begin{aligned} \dot{U} &= j\omega k_\omega \int_{\varphi_0}^{\varphi_0 + \frac{\pi}{p}} \mu \dot{H}_r l_i r e^{-ip\varphi}\, d\varphi = \frac{2\mu\omega}{p} w k_w l_i r \dot{H}_r e^{-ip\varphi_0}, \\ \dot{J} &= \frac{\pm \pi p}{2 m w k_w} \int_{\varphi_0 - \frac{\pi}{2p}}^{\varphi_0 + \frac{\pi}{2p}} \dot{H}_\varphi r e^{-ip\varphi} d\varphi = \pm \frac{\pi}{m w k_w} r \dot{H}_\varphi e^{-ip\varphi_0}. \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Aici s-a notat cu wk_w numărul efectiv de spire al unei faze a bobinajului de referinţă, cu m numărul de faze al acestui bobinaj şi cu l_i lungimea de calcul a maşinii. Semnul expresiei curentului $\dot{J}$ se ia (—) sau (+) după cum normala la suprafaţa frontieră — îndreptată spre interiorul domeniului — coincide sau nu cu sensul versorului coordonatei radiale r.

Dacă frontierele nu coincid cu suprafeţele de fier ale armăturilor, expresiile (8) nu au o semnificaţie fizică directă, dar sînt mărimi de calcul utile, cum se va vedea mai jos *).

Condiţiile la limită se pun sub forma

$$\left.\begin{aligned} \text{la } \zeta = \zeta_1 &: \ \dot{U} = \dot{U}_1 \ \text{şi} \ \dot{J} = \dot{J}_1 \ \text{(cu semnul +)}, \\ \zeta = \zeta_2 &: \ \dot{U} = \dot{U}_2 \ \text{şi} \ \dot{J} = \dot{J}_2 \ \text{(cu semnul —)}. \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Înlocuind relaţiile (9) în sistemul (7) şi ţinînd seama de (8), prin eliminarea constantelor de integrare $\dot{C}_1$ şi $\dot{C}_2$ se pot obţine următoarele

*) Cu ajutorul acestor mărimi se poate trece direct la o schemă echivalentă de forma unui cuadripol şi astfel racordarea diferitelor domenii se reduce la înlăţuirea unor cuadripoli în schema echivalentă a maşinii.

relații între mărimile $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, $\dot{J}_1$ și $\dot{J}_2$:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= Z_{11}\dot{J}_1 + Z_{12}\dot{J}_2, \\ \dot{U}_2 &= \dot{Z}_{21}\dot{J}_1 + Z_{22}\dot{J}_2, \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

unde

$$\left.\begin{aligned} Z_{11} &= j\frac{2m\mu\omega}{\pi}(wk_w)^2 l_i \frac{1}{\zeta_1}\frac{K_p(\zeta_1)I'_p(\zeta_2) - K'_p(\zeta_2)I_p(\zeta_1)}{K'_p(\zeta_1)I'_p(\zeta_2) - K'_p(\zeta_2)I'_p(\zeta_1)}, \\ Z_{22} &= j\frac{2m\mu\omega}{\pi}(wk_w)^2 l_i \frac{1}{\zeta_2}\frac{K_p(\zeta_2)I'_p(\zeta_1) - K'_p(\zeta_1)I_p(\zeta_2)}{K'_p(\zeta_1)I_p(\zeta_2) - K'_p(\zeta_2)I'_p(\zeta_1)}, \\ Z_{12} = Z_{21} &= j\frac{2m\mu\omega}{\pi}(wk_w)^2 l_i \frac{1}{\zeta_1\zeta_2}\frac{1}{K'_p(\zeta_1)I'_p(\zeta_2) - K'_p(\zeta_2)I'_p(\zeta_1)}. \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

Sistemului (10) îi corespunde schema echivalentă din figura 3, în care

$$\left.\begin{aligned} Z_1 &= Z_{11} - Z_{12}, \\ Z_2 &= Z_{22} - Z_{12}, \\ Y_{12} &= \frac{1}{Z_{12}}. \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

Această schemă se încorporează în schema echivalentă a mașinii asincrone ca în figura 4. Deci impedanța Z_1 se adună cu impedanța de scăpări statorice $r_1 + jx_1$, Z_2 se adună cu impedanța rotorică $\frac{r'_2}{s} + jx'_2$ (raportată la înfășurarea statorică), fără însă a contribui la formarea cuplului mașinii, iar Z_{12} reprezintă impedanța de magnetizare a mașinii.

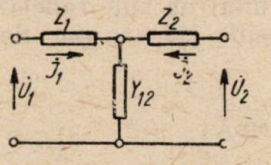


Fig. 3. — Schema echivalentă corespunzătoare sistemului de relații (10).

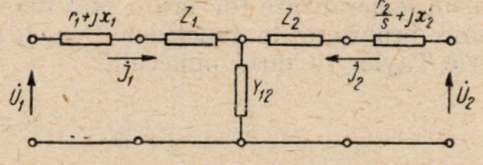


Fig. 4. — Schema echivalentă simplificată a motorului asincron cu cilindru de etanșare în întrefier (se neglijează întrefierurile δ_1 și δ_2 și influența magnetizării fierului).

Schema echivalentă din figura 4 este valabilă numai în cazul neglijării pierderilor în fier și pentru mașina cu tot întrefierul ocupat de cilindrul de etanșare. În realitate, atît de o parte cît și de alta a cilindrului, vor rămîne întrefierurile δ_1 și δ_2. Fiecărui întrefier îi va corespunde cîte o porțiune de schemă de genul celeia din figura 3, astfel

încît schema echivalentă a mașinii va avea forma din figura 5. Impedanțele $Z_{1\delta 1}$, $Z_{2\delta 1}$ și $Z_{1\delta 2}$, $Z_{2\delta 1}$, datorite fluxului de scăpări prin întrefierurile δ_1 și δ_2, sînt pur reactive, ca și admitanțele de magnetizare $Y_{1,\delta 1}$ și $Y_{12\delta 2}$. Suplimentar s-au prevăzut admitanțele $Y_{\mathrm{Fe}\,1}$ și $Y_{\mathrm{Fe}\,2}$, corespunzătoare puterilor de magnetizare și de pierderi în fierul statoric, respectiv rotoric*), obținîndu-se astfel schema echivalentă completă a mașinii asincrone cu cilindru de etanșare în întrefier. Mai rămîne numai

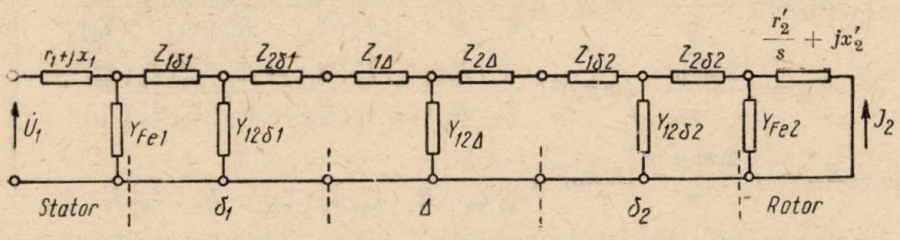


Fig. 5. — Schema echivalentă completă a motorului asincron cu cilindru de etanșare în întrefier.

de precizat modul de calculare a diferitelor impedanțe și admitanțe care intervin în schema echivalentă din figura 5.

Calculul impedanțelor de scăpări $r_1 + jx_{1s}$ și $\frac{r_2'}{s} + jx_{2s}'$, precum și a impedanțelor de magnetizare a fierului $Z_{\mathrm{Fe}\,1}$ și $Z_{\mathrm{Fe}\,2}$ se conduce după metodele clasice, folosite la mașinile asincrone obișnuite.

Impedanțele $Z_{1\Delta}$, $Z_{2\Delta}$ și admitanța $Y_{\Delta 12}$, corespunzătoare cilindrului de etanșare, se calculează din expresiile (11) și (12). Dar expresiile (11) nu se pot folosi direct la calcule, întrucît funcțiile Bessel sînt tabelate numai pentru argumente reale sau pur imaginare, iar funcțiile Thomson generalizate (de ordin mai mare ca unu) nu sînt tabelate [5]. Folosind proprietățile funcțiilor Bessel, expresiile (11) se pot dezvolta în serie Taylor în jurul punctului

$$\zeta_0 = \frac{1}{2}(\zeta_1 + \zeta_2) = r_0\sqrt{j\omega\mu\lambda}, \tag{13}$$

care dă cea mai rapidă convergență a seriilor. Notînd

$$\eta = \frac{\zeta_1 - \zeta_2}{\zeta_1 + \zeta_2} = \frac{r_1 - r_2}{r_1 \quad r_2} = \frac{\Delta}{2r_0}, \tag{14}$$

după calcule destul de laborioase, care nu se reproduc aici, se pot deduce următoarele expresii ale impedanțelor circuitului echivalent din figura 3

$$(a)\ Z_1 = 2\eta^2 k_1 Z_0;\ (b)\ Z_2 = 2\eta^2 k_2 Z_0;\ (c)\ Y_{12} = (p^2 + \zeta_0^2) k_{12} Y_0, \tag{15}$$

unde Z_0 respectiv Y_0, este impedanța, respectiv admitanța de referință,

*) Dacă Y_{Fe2} se consideră formată dintr-o rezistență legată în paralel cu o reactanță, rezistența va depinde de alunecarea rotorului.

egală cu reactanța, respectiv cu susceptanța de magnetizare a unei mașini bipolare, fără cilindru de etanșare în întrefierul de lărgime Δ,

$$Z_0 = \frac{1}{Y_0} = j\,\frac{2\,m\,\mu\,\omega}{\pi}\,(w\,k_w)^2\,l_i\,\frac{r_0}{\Delta}, \tag{16}$$

iar factorii k_1, k_2 și k_{12} au expresiile

$$\left.\begin{aligned} k_1 &= 1 - \frac{2\,\zeta_0^2}{3(p^2+\zeta_0^2)}\eta - \frac{1}{3}(p^2+\zeta_0^2-1)\eta^2 + \frac{\zeta_0^2}{45}\,\frac{17(p^2+\zeta_0^2)^2+7p^2-3\,\zeta_0^2}{p^2+\zeta_0^2)^2}\eta^3+\ldots,\\ k_2 &= 1 + \frac{2\,\zeta_0^2}{3\,(p^2+\zeta_0^2)}\eta - \frac{1}{3}(p^2+\zeta_0^2-1)\eta^2 - \frac{\zeta_0^2}{45}\,\frac{17(p^2+\zeta_0^2)+7p^2-3\,\zeta_0^2}{(p^2+\zeta_0^2)^2}\eta^3+\ldots,\\ k_{12} &= 1 + \frac{2(p^2+\zeta_0^2)^2+p^2}{3\,(p^2+\zeta_0^2)}\eta^2 + \frac{2(p^2+\zeta_0^2)^3+10p^4+16p^2\,\zeta_0^2-2\,\zeta_0^4+3p^2}{15\,(p^2+\zeta_0^2)}\eta^4+\ldots \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

Considerarea numai a primilor 3—4 termeni ai dezvoltărilor în serie este suficientă în toate cazurile practice care se pot întîlni la motoarele cu cilindru de etanșare în întrefier.

Este interesant de arătat că expresiile coeficienților k_1, k_2 și k_{12} s-ar fi putut calcula aproximativ pentru cazul cînd se neglijează curbura cilindrului de etanșare, adică punînd $r = \infty$ în (4), și obținîndu-se în cele din urmă expresiile

$$\left.\begin{aligned} k_1 = k_2 &= \frac{\operatorname{th}\eta\sqrt{p^2+\zeta_0^2}}{\eta\sqrt{p^2+\zeta_0^2}},\\ k_{12} &= \frac{\operatorname{sh}2\,\eta\sqrt{p^2+\zeta_0^2}}{2\eta\sqrt{p^2+\zeta_0^2}}. \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

Însă valorile date de expresiile (18) diferă destul de mult de cele date de expresiile (17) și deci folosirea expresiilor (18) nu se recomandă decît pentru $p^2 \gg 1$ sau $\zeta_0^2 \gtrless j$, diferențele relative dintre coeficienții dezvoltărilor în serie ale celor două expresii ale factorului k_{12} fiind de ordinul $\frac{1}{p^2}$ sau $\frac{j}{\zeta_0^2}$, iar pentru factorii k_1 și k_2 diferențele sînt și mai mari, însă în medie, pentru $k_1 + k_2$, sînt de același ordin ca pentru k_{12}. Adevăratul domeniu de aplicare al expresiilor (18) este acela al studiului influenței armonicilor superioare ale cîmpului, în special al armonicilor de dentură.

Impedanțele corespunzătoare întrefierurilor δ_1 și δ_2 se pot calcula cu aceleași formule (15), (16) și (17), însă avînd în vedere următoarele particularități:

— conductibilitatea electrică a întrefierurilor este nulă, deci $\zeta_0 = 0$ pentru aceste porțiuni;

— întrefierurile fiind relativ mici, $\eta \ll 1$ și deci se poate considera $k_1 = k_2 = k_{12} = 1$;

— trebuie să se țină seama și de majorarea aparentă a întrefierurilor datorită crestării armăturilor (factorii Carter k_{C1} și k_{C2} , calculați pentru întrefierul total $\delta_1 + \Delta + \delta_2$).

Ținînd seama de aceste particularități, se pot stabili formule de calcul mult simplificate pentru impedanțele și admitanțele corespunzătoare acestor două întrefieruri. Se definesc în primul rînd lărgimile echivalente ale întrefierurilor, care țin seama de crestarea armăturilor:

$$\left.\begin{aligned} \delta_1' &\approx k_{C1}\,\delta_1 + (k_{C1} - 1)(\Delta + \delta_2), \\ \delta_2' &\approx k_{C2}\,\delta_2 + (k_{C2} - 1)(\Delta + \delta_1). \end{aligned}\right\} \tag{19}$$

Impedanțele (reactanțele) de scăpări se exprimă prin formulele

$$Z_{1\delta 1} \approx Z_{2\delta 1} \approx Z_{00}\frac{\Delta\,\delta_1}{r_0(r_1 + R_1)}, \tag{20}$$

$$Z_{1\delta 2} \approx Z_{2\delta 2} \approx Z_{00}\frac{\Delta\,\delta_2}{r_0(r_2 + R_2)}, \tag{21}$$

iar admitanțele (susceptanțele) de magnetizare sînt date de expresiile

$$Y_{12\delta 1} \approx Y_{00}\frac{\delta_1'}{\Delta}\frac{r_1 + r_2}{r_1 + R_1}, \tag{22}$$

$$Y_{12\delta 2} \approx Y_{00}\frac{\delta_2'}{\Delta}\frac{r_1 + r_2}{r_2 + R_2}. \tag{23}$$

În aceste expresii, impedanța Z_{00} și inversul ei (Y_{00}) au valoarea dată de formula (16) pentru $\mu = \mu_0$.

Pentru definitiva precizare a parametrilor schemei echivalente complete a mașinii cu cilindru de etanșare în întrefier, a mai rămas de arătat cum se ține seama de efectul de margine, la părțile ieșinde din întrefier ale cilindrului de etanșare.

Efectul de margine acționează în sensul micșorării curenților care iau naștere în cilindrul de etanșare și de influența lui se ține seama în mod aproximativ în două moduri:

— se consideră conductibilitatea materialului cilindrului micșorată în raportul $1 : k_r$, k_r fiind un factor de majorare a rezistenței, calculat conform [4], în ipoteza unui cilindru foarte subțire;

— se micșorează numai conductanța — partea reală a admitanței $Y_{12\Delta}$ — în raportul $1 : k_r$.

Al doilea mod de a proceda este mai corect, întrucît efectul de margine influențează numai curenții induși de componenta radială a inducției magnetice din întrefier.

Ținînd seama de grosimea diferită la capete a cilindrului de etanșare, pe baza lucrării [4] se calculează următoarea expresie a factorului k_r

$$k_r = 1 + \frac{2r_0}{pl_i} \frac{1}{\operatorname{cth} \frac{pl_i}{2r_0} - \frac{2r_0}{pl_i} + \frac{\Delta_f}{\Delta} \operatorname{th} \frac{p b_r}{r_0}}, \tag{24}$$

b_r fiind lungimea axială a porțiunii ieșinde din întrefier a cilindrului de etanșare de grosime Δ_f (vezi fig. 2).

Schema echivalentă completă desfășurată a mașinii cu cilindru de etanșare în întrefier (fig. 5) se poate aduce la forma clasică, în T, grupînd succesiv impedanțele din porțiunea centrală*). În acest fel se poate ajunge la schema echivalentă concentrată din figura 6. Examinarea acestei

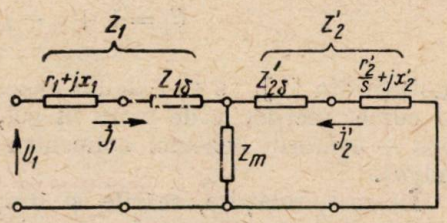


Fig. 6. — Schema echivalentă concentrată a motorului asincron cu cilindru de etanșare în întrefier.

scheme arată sensul în care sînt influențate caracteristicile mașinii de prezența cilindrului de etanșare:

— impedanța de scurtcircuit a motorului crește (datorită lui $Z_{1\delta}$ și $Z'_{2\delta}$), deci diametrul diagramei circulare a mașinii scade, scăzînd și cuplul maxim al motorului;

— alunecarea motorului crește atît datorită micșorării diametrului cercului diagramei de funcționare, cît și măririi impedanței rotorice (cu $Z'_{2\delta}$);

— crește mult atît componenta reactivă a curentului de mers în gol, cît și componenta activă;

— randamentul motorului scade mult.

Unele dintre aceste concluzii sînt evidente, însă cauzele exacte nu sînt chiar atît de ușor vizibile la o examinare sumară. Mai trebuie arătat aici și modul în care se pot evalua pierderile suplimentare în cilindrul de etanșare, produse de armonicile cîmpului magnetic din întrefier. În prima aproximație, se poate considera că aceste pierderi se raportează la pierderile în cilindru produse de cîmpul fundamental ca energia cîmpului diferențial din întrefier la energia cîmpului fundamental. Calcule mai exacte se pot efectua aplicînd formulele (15 c), (16), (18), fiecărei armonici a cîmpului, însă precizia suplimentară astfel obținută, pe lîngă că este iluzorie, nici nu are vreo importanță practică, majoritatea pierderilor fiind produsă de fundamentala cîmpului.

*) Cel mai ușor, această grupare se face calculînd parametrii cuadripolului echivalent în T din încercările fictive de mers în gol la alimentare succesivă dintr-o parte și din alta.

Se mai observă că datorită prezenței cilindrului de etanșare în întrefier impedanța de mers în gol a mașinii nu poate fi asimilată la construirea diagramei circulare cu o reactanță pură și metodele simplificate de construire a acestei diagrame nu mai pot fi utilizate. Se recomandă să se folosească construcția diagramei circulare „exacte" din [7] sau „corectate" din [8] a mașinii asincrone. Precizarea cea mai esențială constă în aceea că la determinarea centrului cercului, diametrul care trece prin punctul de mers în gol ideal este înclinat față de axa imaginară cu unghiul

$$\alpha = -\arg \frac{Z_1 + Z_m}{Z_m},$$

notațiile fiind conform figurii 6. De asemenea, mărimea

$$C_1 = 1 + \sigma - jr = 1 + \frac{Z_1}{Z_m},$$

cu notații din [7], se va calcula exact, fără a neglija pierderile în „fier" (mai corect pierderile de mers în gol, căci aici sînt asimilate acestei categorii — conform schemei concentrate din figura 6 — și pierderile din cilindru).

În rest, relațiile, scările și dreptele diferitelor mărimi rămîn aceleași ca la diagrama circulară „exactă" sau „corectată" a mașinii asincrone.

Înainte de a încheia prezentul studiu, se mai pot face unele considerații asupra caracteristicilor constructive ale motoarelor cu cilindru de etanșare în întrefier.

Mărimea η, cu care sînt proporționale (în primă aproximație) pierderile active din cilindrul de etanșare și puterea reactivă de magnetizare (relațiile (15 c) și (14)), caracterizează cilindrul din punctul de vedere al rezistenței mecanice, fiind egală cu dublul raportului dintre presiunea maximă admisă p_{max} a fluidului din interiorul cilindrului și rezistența mecanică admisibilă σ_a a materialului cilindrului

$$\eta = \frac{2 p_{max}}{\sigma_a}.$$

Din această cauză, la presiune dată în interiorul cilindrului, mărimea η nu se poate micșora decît fie prin utilizarea unor materiale cu caracteristici mecanice superioare, fie prin „sprijinirea" cilindrului de etanșare prin fretare (prin fierul statoric în porțiunea din întrefier și prin inele la părțile frontale) sau cu ajutorul unei contrapresiuni, care să echilibreze o parte a presiunii din interiorul cilindrului de etanșare.

Examinînd în continuare posibilitățile de îmbunătățire a parametrilor energetici ai motorului, la η = const., se observă că pierderile din cilindrul de etanșare se mai pot reduce prin micșorarea conductibilității λ a materialului și prin mărirea lungimii l_i a mașinii. Prima observație impune folosirea unor aliaje cu rezistivitate electrică ridicată, iar împreună cu condiția de permeabilitate magnetică redusă și de rezistență mecanică ridicată conduce la recomandarea aproape în

exclusivitate a oţelurilor inoxidabile cu structură austenitică, care sînt nemagnetice, au o rezistivitate mare ($\rho = 0{,}75 \ldots 1{,}15$ $\Omega mm^2/m$) şi o rezistenţă mecanică admisibilă ridicată ($\sigma_a = 15 \ldots 18$ kgf/mm^2). În sfîrşit, a doua observaţie conduce la recomandarea executării maşinii cu un diametru cît mai mic, pentru obţinerea unei lungimi cît mai mari.

CONTRIBUTIONS TO THE THEORY OF THE INDUCTION MOTOR WITH WATERTIGHT CYLINDER IN THE AIR GAP

ABSTRACT

Induction motors with watertight metal cylinder in the air gap are used in the chemical industry for pumping corrosive liquids or for high pressure pumping. The presence of this cylinder which can be in some cases 10 — 20 mm thick affects to a large extent the induction motor characteristics. The quantitative relations for evaluating such effects are sought to be established.

Starting from a certain simplified scheme of the problem and studying only the effect of the air gap field fundamental, the electromagnetic field equations in the tightening cylinder are integrated. Before setting the boundary conditions, the equivalent circuit of the machine is deduced directly from the expressions of the field quantities, which relieves considerably the representation and simplifies essentially the results. The complete equivalent circuit of the induction motor with tightening cylinder in the air gap is established and the exact and approximate expressions of the new parameters of the circuit are given. The results are discussed and conclusions are stated.

BIBLIOGRAFIE

1. Н. Е. Вишневский, *Экранированный электродвигатель для химической аппаратуры.* Химическая промышленность, *2*, 102—105 (1956).
2. Walter Egli, *Anforderungen der chemischen Industrie an die Elektromotoren.* ETZ—A **76**, *16* (11 aug.), 558—566, (1955).
3. Tivadar Tóth, *Légrésbetétcsöves buvármotorok méretezésének néhány kérdése.* Elektrotechnika, **49**, *3*, 73—78 ; *4*, 115—119 (1956).
4. Augustin Moraru, *Rezistenţa rotorului în formă de pahar.* Electrotehnica, A.S.I.T., 5,153—.56 (957).
5. Г. Н. Ватсон, *Теория бесселевых функций — часть первая.* Изд. иностр. литературы, Москва, 1949.
6. A. Gray, G. B. Mathews, *Funcţiile Bessel şi aplicaţiile lor în fizică.* Edit. tehnică, Bucureşti, 1958.
7. R. Richter, *Maşini electrice,* IV, Edit. tehnică, Bucureşti, 1960.
8. М. П. Костенко, *Электрические машины. Специальная часть.* Госэнергоиздат, Москва—Ленинград, 1949.

CONCEPTELE ȘI PROCEDEELE „ANALIZEI NODALE" ASOCIATĂ CALCULATORULUI NUMERIC*)

DE

PAUL DIMO

MEMBRU CORESPONDENT AL ACADEMIEI R.P.R.

621.311.1 : 621.372 : 519.8

Principiile *analizei nodale* utilizînd curenții de scurtcircuit au fost prezentate de autor prima oară în anii 1955—1956 în cadrul unor studii de stabilitate făcute la Institutul de energetică al Academiei R.P.R. [1], [2], [3]. În 1958 au fost rezumate principiile metodei la Conferința Internațională a Marilor Rețele (CIGRE) în raportul nr. *302*.

În ultimii ani, au fost lămurite și procedeele matematice pentru asocierea acestui tip de analiză, în cazurile cele mai complexe, cu calculatoarele numerice. S-au obținut două certificate de autor în R.P.R. și un brevet internațional (pentru analizorul grafic) în legătură cu noul procedeu.

La Institutul de studii și proiectări energetice din București (ISPE) această cale de analiză este utilizată curent, asociată cu calculatoarele numerice CIFA [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10].

★

TERMENI ȘI NOTAȚII UTILIZATE

(vezi figurile 1, 2, 3)

m — bara centrală a nodului m la care sînt legate generatoare și sarcini;

m' — bara internă a unui generator (de regulă — fictivă unde se aplică tensiunea generatorului m (Em').

*) Lucrare prezentată într-o ședință specială a sesiunii CEI, iulie 1962, din București și la Academia R.P.R., Institutul de Energetică la 9 mai 1963.

A. Notații generale pentru ecuațiile matriciale

y_{ij} — termen al matricei coeficienților y de natura unor admitanțe, din linia i coloana j fără nici o altă semnificație. Acești termeni *capătă aceeași notație în cursul transformării matricei* chiar dacă își schimbă valoarea, atît timp cît corespund aceleiași linii (i) și aceleiași coloane (j). În ecuațiile matriciale nu se utilizează niciodată bare asupra simbolurilor.

B. Notații pentru scheme

$\overline{Y}_{ii'}$ ($\overline{Y}_{mm'}$) — admitanța ce leagă la bara i (respectivă m) generatorul i (respectiv m);

$\overline{Y}_{ii''}$($\overline{Y}_{mm''}$) — admitanță legată direct la bara i (respectiv m) figurînd o sarcină *liniarizată* (de ex. $\overline{I}_i = \overline{Y}_{ii''}\,\overline{U}_i$).

C. Admitanțe de transfer

Starea rețelei pentru definirea admitanțelor de transfer $\overline{Y}_{im'}$ și $\overline{Y}_{im''}$ ale barei i este (vezi fig. 2):

1. Rețeaua *pasivizată* prin scurtcircuitarea tuturor tensiunilor aplicate.

2. Toate sarcinile exterioare barei centrale a nodului i *liniarizate* adică înlocuite cu admitanțe (de ex. $\overline{Y}_{mm''}$ în nodul m).

De reținut că singura sarcină *neliniarizată* rămîne sarcina barei centrale a nodului i pentru care se definesc admitanțele:

$\overline{Y}_{im'}$ — admitanța de transfer între bornele i și m' (vezi figurile 2 *a* și *b*); cu rețeaua în starea arătată reprodusă în figura a 2-a dacă se aplică tensiunea $\overline{U}_i$ la bornele i (între i și pămînt) se măsoară curentul $\overline{I}_{mm'}$ ce traversează admitanța $\overline{Y}_{mm'}$ rezultă: $\overline{I}_{mm'} = \overline{Y}_{im'}\,\overline{U}_i$ (fig. 2*a*);

$\overline{Y}_{im''}$ — admitanța de transfer între bara i și borna m'' a admitanței ce figurează în locul sarcinii din nodul m; la fel ca mai sus, dacă aplicăm rețelei în starea arătată tensiunea $\overline{U}_i$ între bornele i și măsurăm curentul $\overline{I}_{mm''}$ ce traversează admitanța $\overline{Y}_{mm''}$ rezultă: $\overline{I}_{mm''} = \overline{Y}_{im''}\,\overline{U}_i$ (fig. 2 *a*);

$\overline{Y}_{is}$ — admitanța echivalentă în nodul i pentru întreaga sarcină exterioară. Rezultă din relația

$$\overline{Y}_{is} = \sum_{m''} \overline{Y}_{im''}.$$

D. Tensiuni

V_i — tensiunea barei i în general — termen corespunzător liniei i a matricei tensiunilor (fără bară);

$\bar{E}_{i'}$; $(\bar{E}_{m'})$ — tensiuni electromotoare aplicate la bornele i' (respectiv m') ale generatoarelor respective legate prin admitanțe direct la bara i (respectiv m);

$\overline{U}_i$; $(\overline{U}_m)$ — tensiuni rezultate pe bara i (respectiv m).

— Tensiunile sînt considerate cu nod de referință pămîntul.

E. Curenți

$\bar{I}_i$ — curentul injectat din, sau în bara i;

$\bar{I}_{ie}$ — curentul de scurtcircuit trifazat simetric pe bara i, cu tensiune $\overline{U}_i$ înainte de defect; este egal cu suma componentelor produse de tensiunile aplicate: $\bar{I}_{ie} = \sum_{m'} \overline{Y}_{im'} \overline{E}_{m'}$;

$\bar{I}_{im}$ — componenta curentului de scurtcircuit $\bar{I}_{ie}$ produsă de generatorul legat la bara m, $\bar{I}_{im} = \overline{Y}_{im'} . \overline{E}_{m'}$ sau scurtat: curentul de scurtcircuit al generatorului m în nodul i;

$\bar{I}_i{}^0{}_m$ — componenta de mai sus în ipoteza $\overline{E}_{m'} = \overline{U}_i$; în această ipoteză acest generator debita un curent nul înainte de defect în nodul i; de aceea se denumește scurtat: curentul de scurtcircuit al generatorului m în gol, în nodul i;

$\bar{I}_{i0}$ — curentul de scurtcircuit trifazat simetric pe bara i „în gol", corespunde cazului în care $\bar{I}_i = 0$ înainte de defect și tensiunea nodului i era U_i; de remarcat că acest curent rezultă egal cu suma curenților de scurtcircuit în gol ai generatoarelor (adică $\sum I_i{}^0{}_m$), plus un curent echivalent în nodul i (al sarcinii exterioare);

$\bar{I}_{is}$ — curent echivalent în nodul i al sarcinii exterioare egal cu: $\bar{I}_{is} = \overline{Y}_{is}\ \overline{U}_i$.

I. Concepte

În cele de mai jos se arată restructurarea conceptelor de aplicat în studiul sistemelor electroenergetice moderne de o mare complexitate, în vederea reintroducerii unui sistem simplu de raționament. Calea generală poate fi caracterizată prin folosirea unui *echivalent tip* în orice punct al sistemului.

Echivalentul tip pe care îl folosim pentru examinarea oricărei probleme este: *schema radială*, schemă care înlocuiește în *analiza nodală* propusă de noi sistemul complex în întregime, pentru orice punct (bară, nod), al sistemului.

În studii anterioare [1], [2], [3] am arătat soluțiile simple la care pot fi reduse diversele categorii de probleme în cazul schemelor de tip radial, în special în ceea ce privește raționamentul.

Procedeele arătate mai jos conduc la obținerea *echivalentului tip* în cazul rețelelor complexe, cu ajutorul calculatorului numeric și arată posibilitățile de folosire mai departe a aceleiași scheme simple (radiale).

★

Plecăm de la constatarea că stările unui sistem electroenergetic sînt cunoscute, dacă se cunosc stările din nodurile sistemului. Cunoașterea

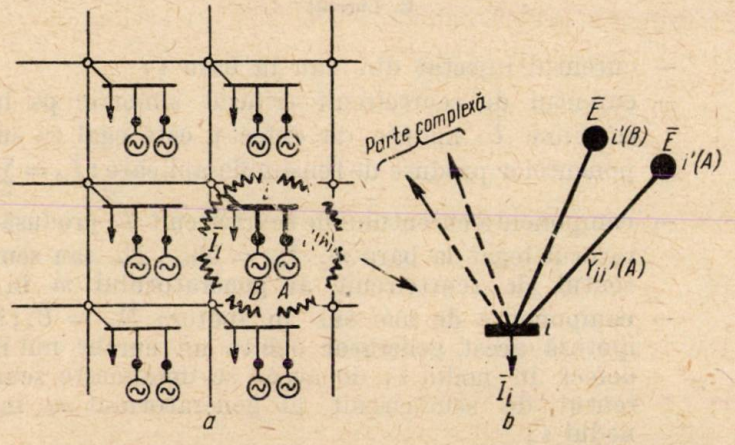


Fig. 1. — Concept 1. Nodul separat de rețeaua complexă. Generatorii *A* și *B* legați radial la bara *i* rămîn reproduși neschimbați în schema echivalentă a nodului *i*.

stărilor pe noduri poate fi făcută prin examinarea fiecărui nod, detașat de rețeaua complexă. Rezultă primul concept.

1. *Primul concept*: *nodul separat de rețeaua complexă*

Nodul aparținînd unui sistem are, pe de o parte, legături directe către generatori sau sarcini, pe care le vom numi radiale, iar pe de altă parte, legături către partea complexă*).

Pentru stabilirea echivalenței căutate pentru nod, vom păstra legăturile radiale, dar le vom tăia pe cele către partea complexă. În concluzie:

a) Elementele legate radial la nod sînt păstrate cu adevărata lor identitate;

b) Legăturile la partea complexă a rețelei sînt înlocuite cu un echivalent. Cu stabilirea acestui echivalent se ajunge la conceptul II.

*) Numim partea complexă pentru nodul *i* elementele nelegate direct (radial) la nodul *i*.

2. *Al doilea concept*: *Schemă radială echivalentă şi independentă pentru un nod REI* (radial, echivalent, independent)

Am văzut [5], [10], [11] că partea complexă a unei reţele poate fi înlocuită pentru un anumit nod (i) în care există o injecţie*) de curent $\bar{I}_i$ cu un echivalent format din simple ramuri radiale cu tensiuni aplicate la capete ce corespund de fapt unor generatori echivalenţi, plus o admitanţă echivalentă în nodul central corespunzînd sarcinii exterioare nodului i. Ecuaţia curentului de sarcină $\bar{I}_i$ din nodul central al acestei scheme apare funcţie de:

— tensiunile generatoarelor reale aplicate sistemului $\bar{E}_{m'}$; plus

— tensiunea nodului i: $\bar{U}_i$.

Funcţie de aceste tensiuni scriem ecuaţia curentului injectat I_i în nodul i sub formă generală sub care apare în ecuaţiile matriciale fără distincţie între tensiunile $\bar{E}$ şi $\bar{U}$

$$I_i = \underbrace{y_{i1} V_1 + y_{i2} V_2 + \ldots +}_{A} \underbrace{y_{ii} V_i}_{B}; \tag{1}$$

V_i — tensiunea rezultantă în nodul i (U_i).

V_1, V_2, — tensiunile generatoarelor aplicate sistemului ($E_{m'}$).

Dacă facem $V_i = 0$ obţinem curentul de scurtcircuit din nodul i: I_{ie} conform figurii 2 *b*, cu componentele sale pe tensiuni (partea A a formulei). Dacă facem $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = \ldots = 0$ obţinem curentul I_{i0} denumit de noi curentul de scurtcircuit al „nodului i în gol" (partea B a formulei 1), conform figurii 2 *a*. Dacă exprimăm curenţii de scurtcircuit I_{ie} şi I_{i0} funcţie de componentele lor din figurile 2 *a* şi 2 *b*, pornind de la expresia curentului injectat în nodul i [5]:

$$\bar{I}_i = \underbrace{\bar{I}_{ie}}_{A} - \underbrace{\bar{I}_{i0}}_{B}. \tag{2}$$

Obţinem diverse expresii în locul expresiei (1) în care figurează admitanţele de transfer definite mai sus la C, şi cărora li se pot asocia o corespondenţă cu mărimi fizice [5], [11], [12]. Această asociere apare clar în imaginile nodale (conceptul 3).

Considerăm în primul rînd ecuaţia în care se reproduce sub o formă identică ecuaţia (1), rezultată din suprapunerea efectelor regimurilor din figurile 2 *a* şi 2 *b* [5], [10], [11]. Cu notaţiile considerate (fig. 2):

$$\bar{I}_i = \underbrace{\bar{Y}_{i1'} \bar{E}_{1'} + \bar{Y}_{i2'} \bar{E}_{2'} + \ldots}_{A} - \underbrace{\bar{Y}_{i0} \bar{U}_i}_{B}. \tag{3}$$

*) Denumim curent „injectat" curentul care intră sau iese din o bară (m', i' pentru generatori, respectiv m, i pentru sarcini).

Conform regimului din figura 2 *a* rezultă (din exprimarea componentelor curentului $\bar{I}_{i0}$ egal cu partea B din formula (3))

$$\bar{Y}_{i0} = \overline{\sum} \; Y_{im'} + \sum Y_{im''}. \tag{4}$$

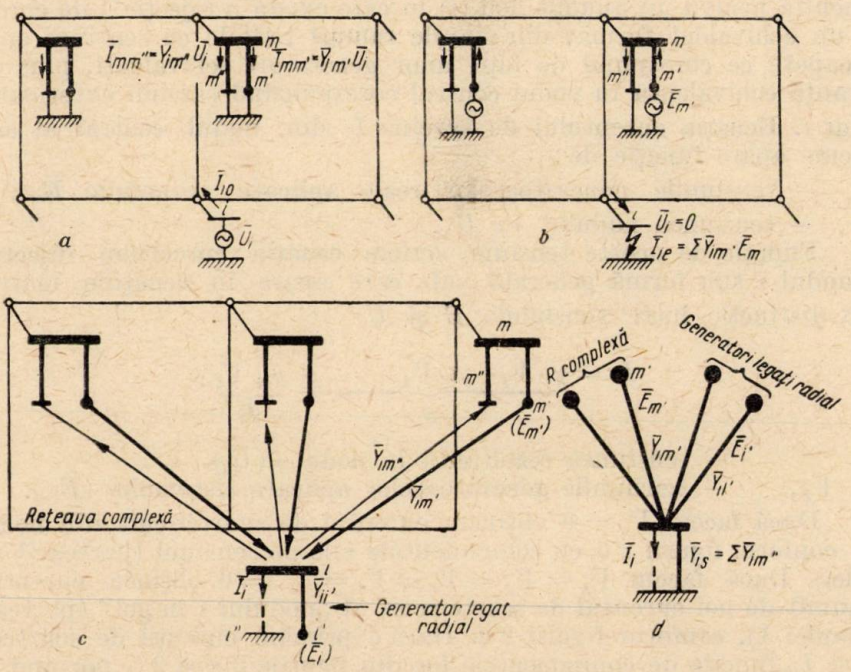


Fig. 2. — Conceptul 2. Înlocuirea părții complexe cu ramuri echivalente radiale. Suprapunerea efectelor regimurilor din schemele *a* și *b*, conduce la ecuațiile *analizei nodale* date de formula 3.

Notînd $\sum Y_{im''} = Y_{is}$ termenul corespunzător sarcinii exterioare, obținem sub altă formă ecuația (2), formă care arată participarea fiecărui generator echivalent sau real (real pentru cele legate radial la nodul i după cum se poate observa ușor

$$\bar{I}_i = \sum_{m'} \bar{Y}_{im'} (\bar{E}_{m'} - \bar{U}_i) - \bar{Y}_{is} \bar{U}_i. \tag{5}$$

Ecuațiile de mai sus presupun toate sarcinile sistemului înlocuite de admitanțe ($\bar{Y}_{mm''}$) cu excepția sarcinii din nodul i (curentul $\bar{I}_i$) (vezi fig. 2 *a* și *b*).

★

Dacă și injecția de curent $\bar{I}_i$ este înlocuită în ecuația (5) de o admitanță pe baza relației $\bar{I}_i = \bar{Y}_{ii''} \bar{U}_i$ atunci obținem o nouă serie de

expresii :

$$0 = \sum_{m'} \underbrace{\overline{Y}_{im'}\,\overline{E}_{m'}}_{A} - \underbrace{(\overline{Y}_{i0} + \overline{Y}_{ii''})\,\overline{U}_i}_{B} \qquad (6)$$

curentul de scurtcircuit $(\overline{I}_e)$

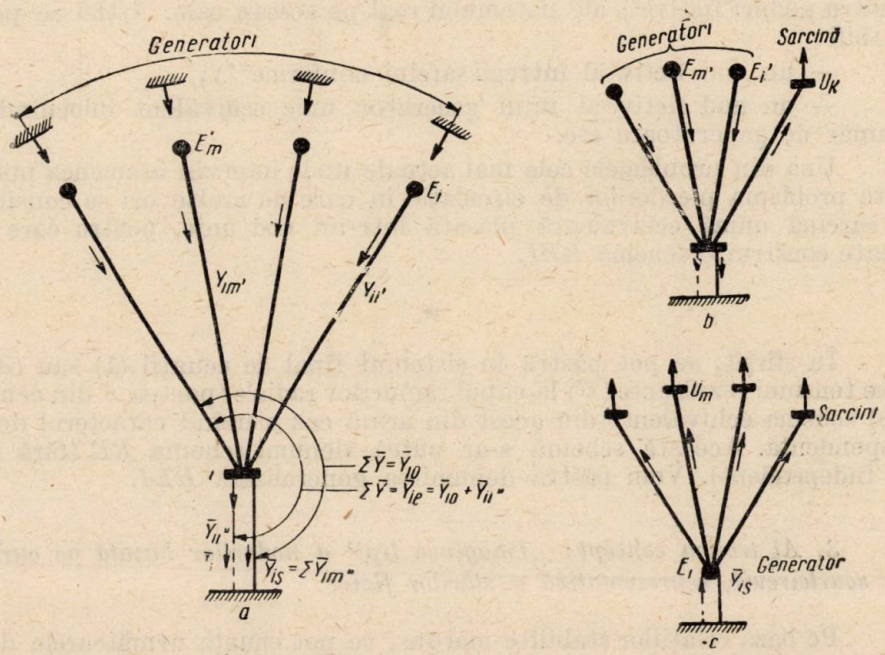


Fig. 3. — Conceptul 2. *a* — schema *REI*; *b* — schemă *RE*; *c* — schema *RE* cu generator central unic.

sau

$$\overline{U}_i = \frac{\Sigma\ \overline{Y}_{im'}\,\overline{E}_{m'}}{\overline{Y}_{ie}} \qquad (7)$$

cu

$$\overline{Y}_{ie} = \overline{Y}_{i0} + \overline{Y}_{ii''}. \qquad (8)$$

Notaţiile adoptate permit să se vadă de unde provine mărimea. Indicii identici cu sau fără accent : *ii'* sau *ii''* indică o admitanţă reală legată direct (radial) la nodul *i*. Indicii diferiţi *im'* sau *is* indică o admitanţă de transfer.

Am denumit schema *REI* a nodului *i*, schema corespunzătoare ecuaţiilor (3) şi (5) de mai sus arătată în figura 3 *a*. Această schemă are următoarele proprietăţi :

— este radială (R);

— este echivalentă (E) pentru nodul i căruia îi corespunde nodul i central al schemei;

— este independentă (I) de orice altă mărime din sistem dacă i se aplică la bornele radiale m' tensiunile reale $E_{m'}$ ce se aplică sistemului la bornele m.

Mai trebuie adăugat că asemenea scheme *REI* pot fi obținute și pentru noduri fictive*) ale sistemului real pe aceeași cale. Astfel se poate stabili:

— un nod fictiv al întregii sarcini conforme**);

— un nod fictiv al unui generator unic echivalent înlocuind un număr de generatoare etc.

Una din problemele cele mai actuale unde intervin asemenea noduri este problema pierderilor de circulație în care de multe ori se consideră o sarcină unică echivalentă plasată într-un nod unic, pentru care se poate construi o schemă *REI*.

★

În sfîrșit, se pot păstra în sistemul final de ecuații (1) sau (3) și alte tensiuni rezultante (U) la capul ramurilor radiale (partea A din ecuația (1)) schema echivalentă din acest din urmă caz pierzînd caracterul de independență. Această schemă s-ar putea denumi schema *RE* (fără I = = independent). Vom păstra denumirea generalizată *REI*.

3. *Al treilea concept*: *„Imaginea tip" a nodurilor bazată pe curenți de scurtcircuit, reprezentativă a stărilor fizice*

Pe baza relațiilor stabilite mai sus, se pot enunța următoarele două teoreme ce stau la baza *imaginilor nodale* [5], [10] demonstrate inițial de J. Fallou pentru cazul particular al schemelor radiale cu sarcină unică:

Teorema 1

*Într-un punct oarecare dintr-o rețea liniarizată****) *curentul de scurtcircuit* ($\overline{I}_{ie}$) *este egal cu curentul pe care l-ar furniza un alternator unic, cu forța electromotoare egală cu tensiunea din punctul de defect* ($\overline{U}_i$) *și a cărui, admitanță ar fi egală cu admitanța echivalentă* ($\overline{Y}_{ie}$) *a admitanțelor tuturor generatoarelor și celor corespunzătoare sarcinilor din rețeaua presupusă pasivizată* (formula (6) demonstrează teorema).

*) Numim noduri fictive noduri ce nu aparțin rețelei reale, formate prin transformarea rețelei reale în un anumit scop.

**) Se denumește sarcina „conformă" sarcina ce variază liniar cu sarcina totală (sau cu o parte din această sarcină).

***) Prin „liniarizată" se înțelege considerarea dependenței liniare între tensiune și curent pentru sarcini.

Teorema 2

Curentul de scurtcircuit ($\bar{I}_{ic}$) *într-un nod cu tensiunea* $\bar{U}_i$ *în care există o injecție de curent* ($\bar{I}_i$) *este egal cu suma dintre curentul de scurtcircuit corespunzător cazului în care nodul ar fi fost sub aceeași tensiune* $\bar{U}_i$ *în gol înainte de defect* ($\bar{I}_i = 0$) *și curentul de injecție al nodului* (formulele (2) și (3) demonstrează această teoremă).

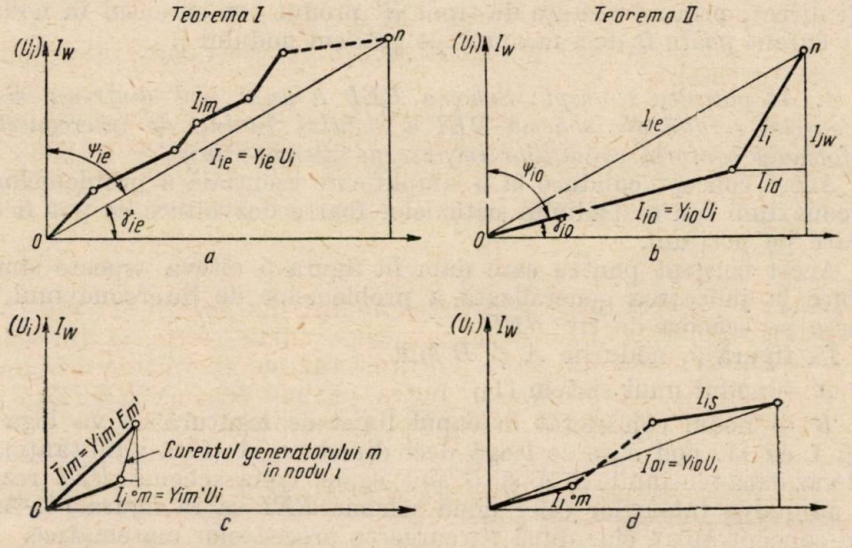


Fig. 4. — Conceptul 3. Imaginea nodului alcătuită din curenții de scurtcircuit.

Aceste două teoreme extinse aici la cazul cel mai general pot fi mai departe completate cu relațiile detaliind aportul fiecărui generator în curentul I_i injectat (vezi (5)) și aportul sarcinii exterioare nodului (vezi (3), (4), (5). Ele permit o reprezentare grafică tip (vezi fig. 4).

Această diagramă tip poate fi considerată :

a. *Ca o imagine tip a nodului* în care ne apar toate mărimile sistemului ;

b. *Ca o imagine a întregului sistem* văzut prin nodul reprezentat.

★

În această imagine :

— fiecare generator din sistem este reprezentat de un vector $\bar{I}_{im}$ (sau 2 vectori fig. 2 *a* și *c*) corespunzător contribuției acestui generator în scurtcircuitul total ($\bar{I}_{ie}$), vector a cărui mărime și fază în nodul reprezentat variază corespunzător variațiilor de mărime și fază ale tensiunii generatorului respectiv ;

— suma tuturor acestor vectori, figura 4 *a* sau *b*, egală cu curentul de scurtcircuit total $\bar{I}_{ie}$ (sau $\bar{I}_{i0}$) variază ca mărime și fază, ca tensiunea

nodului reprezentat ($\bar{I}_{ie}$ variază astfel dacă şi curentul $\bar{I}_i$ este „liniarizat" şi numai $\bar{I}_{i0}$ dacă nu, vezi anexa);

— toate mărimile din sistem, îşi regăsesc pe imagine o corespondenţă din care se poate deduce simplu influenţa lor şi interdependenţa dintre ele [3];

— dacă pe diagramă se figurează şi vectorii $\bar{I}_i{}^0{}_m$ (fig. 4 *c*) găsim participarea fiecărui generator în curentul injectat în nodul *i*. Generatorii legaţi direct, prin admitanţe de tipul *ii'* produc tot curentul în nodul *i*. Acest curent poate fi deci măsurat pe graficul nodului *i*.

4. *Al patrulea concept*: *Schema REI a unui nod dintr-un sistem interconectat rezultă din schema REI a nodului înainte de interconectare, transformată conform condiţiilor impuse de interconexiuni.*

Acest concept conduce la o simplificare esenţială a problemelor de interconexiuni sau a studiului sistemelor foarte dezvoltate ce pot fi considerate pe porţiuni.

Acest concept pentru care dăm în figura 5 cîteva aspecte simple, conduce la judecarea generalizată a problemelor de interconexiuni mai departe pe schema de tip *REI*.

În figura 5, nodurile *A* şi *B* sînt

A — nodul unui sistem (I),

B — nodul considerat la capul liniei de legătură ce va lega sistemul I cu II, nod care se leagă deci direct cu *A* (fără admitanţe). În acest caz dacă tensiunile în *A* şi *B* sînt egale, noua schemă *REI* rezultă prin adunarea ramurilor celor două scheme *REI* ca în figura 5 *b*. Acest ultim concept apare clar după parcurgerea procedeelor matematice.

5. *Comentariu general în legătură cu echivalentele tipizate* (fig. 3).

Din cele de mai sus reţinem:

— *Pentru orice punct* (nod, bară) a sistemului există o schemă radial echivalentă pe care am denumit-o *echivalentul tipizat REI*.

— *Această schemă* se stabileşte în ipoteza că toate sarcinile existente plasate în nodurile exterioare au fost înlocuite cu admitanţe *cu excepţia sarcinii din bara pentru care se stabileşte echivalentul.*

— *Echivalentul radial independent* (*REI*) se stabileşte păstrînd la capul ramurilor radiale tensiunile real aplicate sistemului.

— *Echivalentul radial* poate fi stabilit în general plecînd şi de la alte tensiuni decît cele ale generatoarelor.

— *Aceste echivalente radiale corespund unui anumit regim* al reţelei, din care sînt extrase, regim pentru care rezultă admitanţele echivalente (vezi suprapunerea efectelor: 5, 10, 11).

— *Echivalentul odată stabilit*, împreună cu *imaginea nodală* pentru un nod (bară, punct) dintr-un prim regim, poate fi folosit pentru judecarea situaţiilor posibile din nodul respectiv în alte regimuri în care:

se schimbă tensiunile aplicate (tensiunile reale ale generatorilor reţelei);

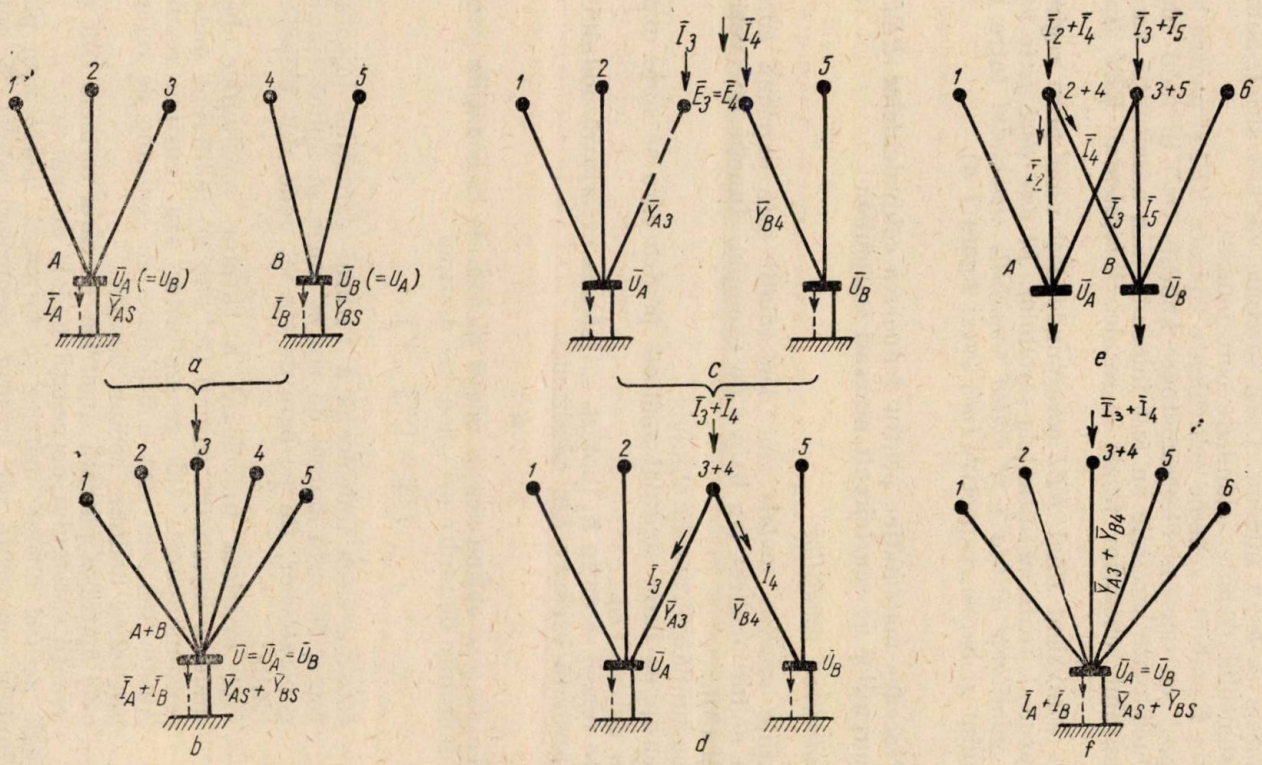


Fig. 5. — Conceptul 4. Exemple cu obținerea schemei *REI* pentru un nod (*b*, *d*, *f*) în cîteva cazuri particulare (*a*, *c*, *e*) de interconexiune între două sisteme. Interconexiunea în nodul *A* cu nodul *B* (*a*, *b*); sau nodul 3 cu nodul 4 (*c*, *d*) etc.

se schimbă sarcinile exterioare păstrînd legea de variație dată de admitanțele ce le-au înlocuit. Dacă sarcinile variază altfel, admitanțele echivalentului trebuie schimbate corespunzător.

— Pot fi stabilite scheme echivalente tipizate *REI* și pentru barele „generatoare" cu tensiuni electromotoare aplicate (m') în mod identic.

— Dacă toate sarcinile au fost înlocuite prin admitanțe, vom denumi ansamblul schemelor finale ce rezultă *Echivalentul REI final al rețelei.*

Acest echivalent final *REI* corespunde deci unui prim regim din care au rezultat toate admitanțele sarcinilor. *El este deci fizic un ansamblu de admitanțe căruia i se aplică tensiunile sistemului* între nodul comun pămînt și barele respective (m') (vezi figura 7 *d*).

II. Procedee matematice pentru deducerea echivalentelor *REI* și a curenților de scurtcircuit necesari imaginilor

6. *Deducerea ecuațiilor*

Ecuațiile *analizei nodale* sînt deci relații care exprimă curentul injectat în nodul analizat (în bara i de exemplu) funcție de (vezi formula (1) și (3))

— tensiunile aplicate sistemului;

— tensiunea barei nodului analizat pentru care se scrie expresia injecției de curent ($\bar{I}_i$).

Aceste relații se obțin în ipoteza că rețeaua exterioară nodului analizat este formată exclusiv din admitanțe.

★

— Pentru a se obține aceste relații plecăm de la ecuațiile generale cunoscute denumite de multe ori „nodale" de tipul

$$[I] = [Y] \cdot [V]$$

în care

$[I]$ — este matricea unicoloană a tuturor curenților injectați în rețea, fie prin barele de tip m' unde se aplică tensiunile generatorilor, fie pe bare de tip m, unde sînt plasate sarcinile;

$[V]$ — este matricea unicoloană a tuturor tensiunilor barelor unde se injectează curenți (m' sau m) indiferent dacă sînt tensiuni aplicate (ale generatorilor) sau tensiuni rezultate. Aceste tensiuni sînt considerate cu tensiune de referință, tensiunea nodului comun pămînt.

$[Y]$ — este matricea pătrată simetrică ai cărei termeni sînt coeficienții sistemului de ecuații nodale de mai sus.

Termenii acestei ultime matrice se formează foarte ușor plecînd de la admitanțele cunoscute ale tuturor ramurilor rețelei și anume:

— termenii y_{ik} din matrice sînt chiar admitanțele ce leagă bara i cu bara vecină k (fig. 6 *a*);

— termenii diagonali y_{ii} reprezintă suma cu semn schimbat a admitanţelor y_{ik} a tuturor ramurilor ce converg la bara i, plus admitanţa y_{ic} repartizată barei i din admitanţele capacitive ale liniilor (considerate π echivalent) dacă este cazul

$$y_{ii} = -\left(\sum_{k} y_{ik} + y_{i_c}\right). \tag{9}$$

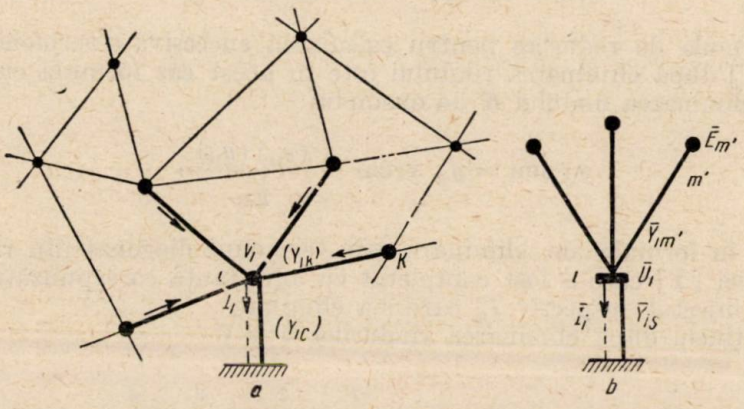


Fig. 6. — a — Schema reţelei reale în jurul nodului i; b — schema *REI* a nodului i.

Obţinem astfel un sistem de ecuaţii în care în general marea majoritate a termenilor y_{ik} sînt nuli (corespund lipsei de legătură directă între nodurile respective).

Să-l scriem pentru 6 noduri sub forma generală:

$$\uparrow \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{vmatrix} = \begin{array}{c} \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & \leftarrow 6 \end{matrix} \\ \uparrow \begin{vmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{vmatrix} \end{array} \times \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{vmatrix} \tag{10}$$

Să presupunem că primele 3 rînduri sînt ecuații corespunzătoare barelor cu tensiuni aplicate (m') și că dorim să obținem echivalentul radial pentru bara 4 cu tensiune V_4 rezultantă (m). Regimul este cunoscut (tensiunile și curenții în toate nodurile).

Pentru aceasta eliminăm pe rînd, de jos în sus ecuațiile 6 și 5 folosind relațiile ce exprimă „liniarizarea" curenților injectați I_6 apoi I_5

$$(I_6 = y_6 V_6; \quad I_5 = y_5 V_5 \ldots).$$

Formula de reducere pentru calcularea succesivă a termenilor matricei $[Y]$ după eliminarea rîndului este în acest caz formula cunoscută (pentru eliminarea nodului K de exemplu)

$$y_{ij}\,\text{nou} = y_{ij}\,\text{vechi} - \frac{(y_{ik})\,(y_{jk})}{y_{kk}}, \tag{11}$$

y_{kk} în formula de eliminare este termenul diagonal din rîndul K al matricei $[Y]$ care a fost completat cu admitanța corespunzătoare curentului injectat respectiv I_k care s-a eliminat.

Obținem după eliminarea rîndurilor 5 și 6

$$\begin{array}{r} \\ \\ \\ \\ \\ \text{Ecuația echivalentului radial pentru bara 4} \rightarrow \end{array} \begin{array}{c} \\ \text{A}\left\{\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array}\right. \\ \\ \end{array} \begin{array}{|c|} \hline I_1 \\ \hline I_2 \\ \hline I_3 \\ \hline I_4 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 4 \end{array} \\ \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} \\ \hline y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} \\ \hline y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} \\ \hline y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} \\ \hline \end{array} \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline V_1 \\ \hline V_2 \\ \hline V_3 \\ \hline V_4 \\ \hline \end{array} \tag{12}$$

Ecuația 4 din (12) este ecuația căutată căci conține numai tensiunile aplicate, plus tensiunea barei 4 notată V_4.

— Analog se pot obține ecuațiile *analizei nodale* pentru barele 5 sau 6. Ele se puteau obține și prin revenirea înapoi de la ecuațiile (12) prin adăugarea pe rînd a ecuației (5) corespunzătoare nodului 5 și eliminarea ecuației (4), apoi adăugarea ecuației (6) și eliminarea ecuației (5), folosind relațiile corespunzătoare de liniarizare a curenților.

Observăm că pentru fiecare din ecuațiile (4), (5) și (6) obținute pe această cale, primele 3 rînduri ale matricei $[Y]$ din ecuația (12) (partea A) rezultă cu termeni diferiți.

★

În adevăr, ecuațiile (4), (5) și (6) ce se obțin astfel presupun fiecare altă stare fizică a sistemului și anume :

a) Ecuaţia (4) — presupune că injecţiile de curent I_5 şi I_6 au fost înlocuite în schemă prin admitanţele corespunzătoare regimului de la care s-a plecat;

b) Ecuaţia (5) — presupune că injecţiile de curent I_4 şi I_6 au fost înlocuite prin admitanţe;

c) Ecuaţia (6) — idem, injecţiile de curent I_4 şi I_5 au fost înlocuite prin admitanţe.

Aceste 3 ecuaţii 4, 5 şi 6, care sînt ecuaţiile denumite de noi ale *analizei nodale* pentru barele (nodurile) 4, 5 sau 6 *nu corespund deci aceluiaşi sistem fizic*. Ele au fost deduse dintr-un singur regim în care însă legile de variaţie ale curentului au fost lăsate libere pe rînd în cele 3 noduri 4, 5 sau 6 şi corespund deci la „echivalente" *REI* diferite pentru întregul sistem. Dacă însă în toate aceste 3 noduri 4, 5 şi 6, presupunem că toţi curenţii de sarcină injectaţi sînt înlocuiţi cu impedanţele corespunzătoare, ajungem, indiferent de ordinea eliminării, la aceiaşi termeni în matricea finală [*Y*] (ecuaţiile rămase, vezi formula (12′)), şi determinăm astfel ecuaţiile *echivalentului REI final* al sistemului.

7. *Ecuaţiile „echivalentului REI final" al sistemului*

Ecuaţiile finale conţin acum 3 rînduri pentru barele cu tensiuni aplicate V_1, V_2, V_3 şi corespund unui sistem fizic în care toate sarcinile au fost înlocuite cu admitanţe. Am numit acest sistem *Echivalentul final* şi el este dat de ecuaţiile (12′).

$$\begin{array}{c|c|} 1 & I_1 \\ 2 & I_2 \\ 3 & I_3 \end{array} = \begin{array}{c|c|c|} 1 & 2 & 3 \\ \hline y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{array} \times \begin{array}{|c|} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{array} \qquad (12')$$

Din procesul de eliminare se poate observa uşor că atît matricea [*Y*] din (12′) cît şi cea din (12) rămîn simetrice ($y_{mn} = y_{nm}$).

Ecuaţiile (12′) verifică şi alte regimuri decît cel de la care s-a plecat numai în cazul în care toţi curenţii injectaţi (ce au fost eliminaţi) ai sarcinilor variază liniar cu tensiunile nodului respectiv.

Din ecuaţia (12′) se vede că şi pentru nodurile cu tensiuni aplicate 1, 2 sau 3, pot fi găsite scheme *REI*, în mod identic (vezi fig. 7) ca pentru nodurile consumatoare, cu diferenţele de semn respective pentru curenţii injectaţi (fiecare linie în formulele (12) corespunde unei scheme *REI*). În adevăr, fiecare din ecuaţiile 1, 2 sau 3, ale ecuaţiilor (12′) exprimă un curent injectat (I_1, I_2 sau I_3) indiferent de semn funcţie de tensiunile exterioare aplicate, plus tensiunea respectivă şi deci sînt ecuaţiile echivalentului radial căutat care poate fi aflat prin identificarea coeficienţilor (vezi formula (1) şi fig. 3 *a*).

Se vede din cele de mai sus că :

— Unui regim îi corespunde un singur *echivalent final REI al sistemului* reprezentat de un ansamblu de scheme *REI* așa cum se vede în figura 7 *d* dat de ecuațiile (12′). Din acest echivalent final *REI* se

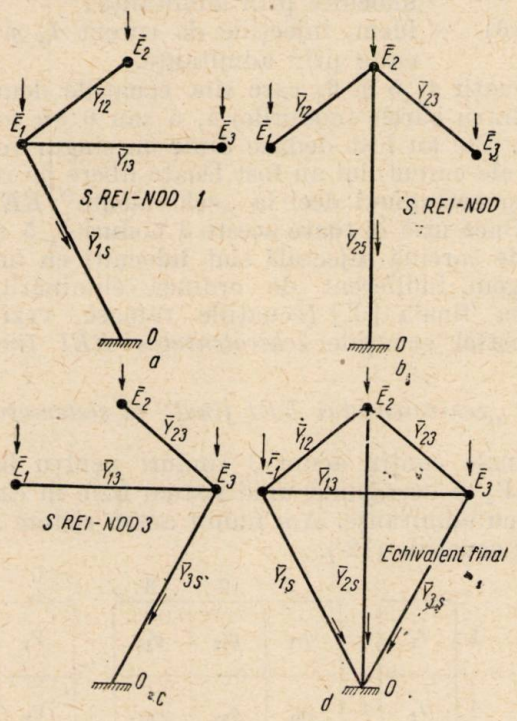


Fig. 7. — *a*, *b*, *c* — Scheme *REI* ale barelor 1, 2, 3. Se pot identifica elementele cu cele ale schemei din figura 3 *a*; *d* — echivalentul final; ansamblu din care s-au separat schemele *REI*, *a*, *b* și *c*.

pot „detașa" direct schemele *REI* pentru toate nodurile „generatoare" (1, 2, 3 în cazul nostru așa cum s-a făcut în fig. 7 *a*, *b*, *c*).

— Schemele *REI* pentru alte noduri se obțin de fapt din *echivalente REI ale sistemului* identice ca structură cu cel final din figura 7 *d* în care însă s-a păstrat explicit și nodul schemei *REI* respective. Ecuațiile acestui echivalent al sistemului sînt ecuațiile (12). El este identic ca structură cu cel din figura 7 *d*, unul din noduri (4 în cazul acesta) fiind în acest din urmă caz nodul pentru care se caută schema *REI*.

8. *Obținerea schemelor radiale (REI) și a imaginilor în toate nodurile*

Să rescriem mai jos sub formă matricială în două grupe de ecuații *A* și *B*, ecuațiile echivalentului final (12′) plus ecuațiile analizei nodale obținute pentru cele 3 noduri : 4, 5 și 6 de rîndul acesta, cu notațiile

E pentru tensiunile aplicate şi U pentru tensiunile rezultante

$$
\begin{array}{c}
\\ A \\ \\ \\ B \\ \\ \\
\end{array}
\left[\begin{array}{c}
I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6
\end{array}\right]
=
\left[\begin{array}{cccccc}
y_{11} & y_{12} & y_{13} & 0 & 0 & 0 \\
y_{21} & y_{22} & y_{23} & 0 & 0 & 0 \\
y_{31} & y_{32} & y_{33} & 0 & 0 & 0 \\
y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & 0 & 0 \\
y_{51} & y_{52} & y_{53} & 0 & y_{55} & 0 \\
y_{61} & y_{62} & y_{63} & 0 & 0 & y_{66}
\end{array}\right]
\times
\left[\begin{array}{c}
E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6
\end{array}\right]
\qquad (13)
$$

sau simbolic

$$
\begin{array}{c} A \\ B \end{array}
\left[\begin{array}{c} I_E \\ I_U \end{array}\right]
=
\left[\begin{array}{c|c} y_E & 0 \\ \hline y_U & y_0 \end{array}\right]
\times
\left[\begin{array}{c} E \\ U \end{array}\right]
\qquad (14)
$$

cu $[y_0]$ matricea diagonală a admitanţelor corespunzătoare curenţilor de scurtcircuit în gol (y_{44}, y_{55}, y_{66}).

Găsirea schemelor echivalente se face uşor din examinarea ecuaţiilor 1, 3, 4 şi identificarea coeficienţilor cuprinşi în matricea $[Y]$ astfel:

— termenii nediagonali ai matricei $[Y]$ din (13) sînt chiar admitanţele ramurilor radiale a schemelor ($y_{jk} = \overline{Y}_{im'}$);

— termenul diagonal este admitanţa cu semn schimbat corespunzătoare curentului de scurtcircuit al nodului „în gol" ($y_{jj} = -\overline{Y}_{i0}$); ($j$ din matrice corespunde lui i din schema reală);

— termenul rezultat din diferenţa dintre termenul diagonal cu semn schimbat şi suma termenilor nediagonali este admitanţa echivalentă din nodul central al schemei REI (fig. 3 a) notată $\overline{Y}_{is}$ pentru nodul i:

$$\overline{Y}_{is} = \sum_{m'} \overline{Y}_{im'} - \overline{Y}_{i0}.$$

★

Pentru deducerea imaginilor nodale se formează produsele admitanţelor ramurilor echivalentului cu tensiunile respective care dau componentele $\overline{Y}\overline{E}$ ale curentului de scurtcircuit total ($\overline{I}_{ie}$), apoi curentul de scurtcircuit al nodului în gol ($\overline{Y}_{i0}\,\overline{U}_i$) etc., toate mărimile fiind cunoscute. Se reaminteşte că este comod pentru grafice ca axele diagramei să fie alese cu axa ordonatelor orientată după curentul activ din nodul respectiv [1, 3, 4, 5, 9, 10, 12, 17 etc.].

9. *Posibilităţi de a obţine orice mărime funcţie de tensiunile aplicate „echivalentului final"*

Dacă în ecuaţiile (13) sau (14) partea B, înlocuim curenţii sarcinilor (I_4, I_5, I_6) prin relaţie ce exprimă dependenţa lor liniară de tensiuni

$$[I] = [y] \cdot [U], \tag{15}$$

obţinem ecuaţiile (16), ce corespund mărimilor rezultate în *echivalentul REI final* al sistemului, cu toate sarcinile liniarizate

$$\begin{matrix} A \rightarrow \\ B \rightarrow \end{matrix} \left[\begin{matrix} I_g \\ 0 \end{matrix}\right] = \left[\begin{matrix} Y_E & O \\ Y_U & Y_e \end{matrix}\right] \times \left[\begin{matrix} E \\ U \end{matrix}\right], \tag{16}$$

cu: Y_e — matrice diagonală conţinînd termenii $\overline{Y}_{ie}$ corespunzători curentului de scurtcircuit cu semn schimbat (vezi formula (7)).

Ecuaţiile B pot fi scrise pentru orice nod, bară sau punct al reţelei şi conduc la determinarea tensiunii rezultante U în acel punct funcţie de tensiunile aplicate. Ele sînt de fapt, în scriere matricială, ansamblu de ecuaţii 5 pentru diversele noduri cu tensiuni rezultante (U) ce pot fi scrise din (16) şi sub forma

$$[U] = -[Y_e]^{-1}[Y_U][E]. \tag{17}$$

Odată tensiunile (U) determinate funcţie de tensiunile aplicate, pot fi determinaţi curenţii din orice linie ce leagă două noduri funcţie de aceleaşi tensiuni aplicate

$$[I_l] = [Y_l]\{[a_E] \times [E] + [a_U] \times [U]\}, \tag{18}$$

în care $[Y_l]$ este matricea conţinînd admitanţele liniilor în care se caută curentul, iar matricele $[a_E]$ şi $[a_U]$ sînt matrice de incidenţă*) ce selecţionează pentru fiecare linie diferenţele de tensiuni de la capetele liniei respective. Se mai poate scrie din (17) şi (18)

$$[I_l] = [Y_l]\{[a_E] - [a_U][Y_e]^{-1}[Y_U]\}[E], \tag{19}$$

iar căderile de tensiune ΔU de-a lungul liniilor respective

$$[\Delta U] = [a_E][E] - [a_U][U] \tag{20}$$

(cu U din ecuaţia (17)).

Astfel se pot determina din *echivalentul REI final* toate mărimile nodale sau pe ramuri, ale reţelei reale, corespunzătoare regimului din care a fost dedus acest echivalent.

*) Matricele de incidenţă conţin numai termeni 0, +1 şi −1

10. *Scheme REI pentru noduri fictive. Schema REI a nodului sarcinii unice*

În multe studii speciale se stabilesc noduri fictive care sînt utilizate pentru simplificare. Citǎm astfel utilizarea nodului sarcinii unice în probleme de pierderi şi optimizări [14, 15].

Toate aceste noduri echivalente, pot fi tratate în mod identic:

— se pot găsi schemele *REI* ale acestor noduri;

— se pot determina *echivalentele REI ale sistemului* în care să fie păstrate asemenea noduri (echivalente de acelaşi tip cu cel din fig. 7 *d*);

— se pot dresa imaginile nodurilor respective şi

— urmări raţionamentele pe scheme radiale şi imaginile lor după cum s-a arătat în lucrări anterioare [8].

Să luăm cazul nodului unic [14], [15] al întregii sarcini. Pentru obţinerea schemei *REI* a acestui nod, imaginii sale şi a echivalentului sistemului respectiv în care să figureze şi acest nod fictiv se procedează astfel, plecînd de la un regim cunoscut:

a) Se obţine echivalentul *REI* final al sistemului prin eliminarea tuturor nodurilor cu sarcini aşa cum s-a arătat mai sus. Acest echivalent final în cazul a 3 generatoare, are aspectul din figura 7 *d*;

b) Se adaugă nodului *O* fost pămînt, detaşat acum de pămînt în serie o admitanţă $-Y_e$ apoi $+Y_e$ şi se formează din nou nodul pămînt, mutat acum la capul acestor două admitanţe ca în figura 8 *a*; cu aceasta nu s-a schimbat nimic în schema *echivalentului REI final.* Admitanţa Y_e este calculată în aşa fel ca traversată de curentul total cunoscut al generatorilor $\bar{I}_e = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3$ să conducă la o pierdere egală cu puterea totală consumată de toate sarcinile din nodurile ce au fost eliminate;

c) În schema astfel formată considerăm nodul *e*, cu tensiunea rezultantă $\bar{U}_e$ şi injecţia de curent $\bar{I}_e = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3$ şi scriem ecuaţiile nodale pentru cele 5 noduri ale noii scheme: 1, 2, 3, 0, *e*; toate admitanţele de legături între aceste noduri sînt cunoscute. Eliminăm apoi nodul 0 cu procedeul arătat mai sus. Se ajunge astfel la ecuaţiile corespunzătoare unui nou echivalent al sistemului (4 ecuaţii) conţinînd un nod în plus (al sarcinii unice). Acest echivalent este arătat în schema din figura 8 *b*. Din acest echivalent al sistemului, cu sarcină unică se pot desprinde:

d) Schema *REI* a nodului echivalent al sarcinii unice *e*. Această schemă conţine ramurile 1-*e*, 2-*e* şi 3-*e* din echivalentul sistemului ca în figura 8 *c*;

e) Schemele *REI* ale nodurilor generatoare 1, 2, 3, considerînd pentru nodul *e*, tensiunea *U* (vezi fig. 8 *d*).

★

Noul echivalent final al sistemului în care s-a lăsat şi nodul *e*, al sarcinii unice va avea ecuaţia matricială cu un rînd şi o coloană în plus faţă de ecuaţia (12′), conţinînd şi nodul cu tensiune U_e şi curent I_e al sarcinii unice.

La fel şi aici, fiecare linie a matricelor (21), dă mărimile necesare schemei radiale corespunzătoare prin identificarea coeficienţilor y.

e. Echivalentul *REI* a sistemului cu sarcină unică rezultă ca un ansamblu de noduri cu curenţi injectaţi, fără nici o admitanţă în nici

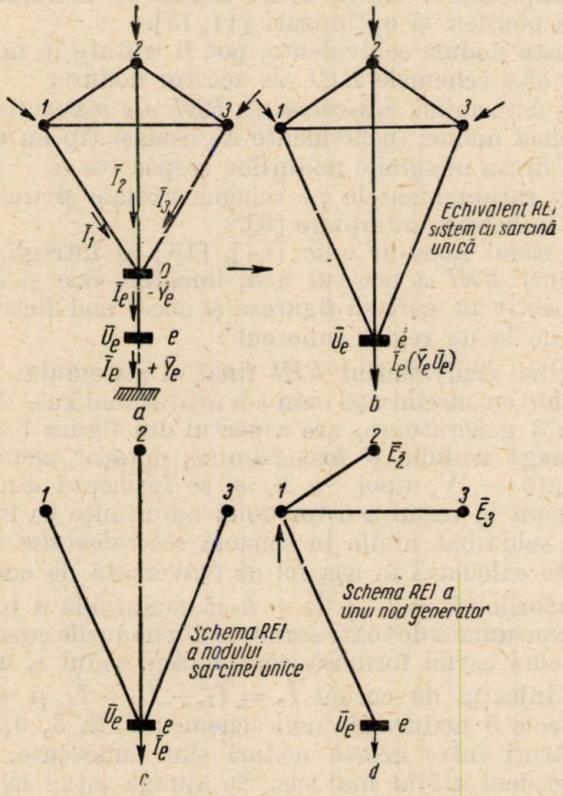


Fig. 8. — *a*) Adăugarea admitanţei — *Ye* pentru formarea noii scheme.
b) Schema *echivalentul final* cu sarcină unică
c) Schema *REI* a nodului sarcinii unice
d) Schema *RE* a generatorului 1.

unul din noduri, corespunzînd unor sarcini echivalente liniarizate. Acest lucru se datoreşte felului cum a fost constituit *nodul echivalent e, în care s-a considerat de fapt injecţia de curent totală a tuturor sarcinilor adunate.* Particularitatea schemelor *REI* respective în acest caz este că admitanţa la pămînt $\overline{Y}_{is}$ (din fig. 3) este zero în toate nodurile. *Puterea ce se pierde în ramurile acestui echivalent este egală cu pierderile sistemului real.* Din această consideraţie se pot deduce metode de evaluare a pierderilor precum şi studii de optimizare a schemelor şi regimurilor [8].

f) Să notăm că procedee identice de formare a unui nod echivalent, pot fi utilizate în cele mai diferite cazuri. În figura 9 se arată stabilirea unui nod echivalent pentru 3 noduri generatoare 1, 2, 3, plecînd de la un regim cunoscut. Calea este identică ca cea arătată mai sus, adică:

$$\begin{array}{c|c|c|

Ajungem la schema *c* căutată, în care nodurile consumatoare cu tensiuni U au rămas neschimbate ca regim în noua schemă, în care avem acum un singur generator ca în figura 9 *c*.

Utilizarea acestor scheme cu noduri fictive echivalente se va face bineînțeles considerînd cu atenție condițiile impuse echivalentului în *utilizarea lui în alte regimuri, din felul în care a fost dedus.*

g) În probleme de interconexiuni, asemenea noduri fictive, echivalente pot fi de asemenea folosite. În general, în reprezentarea interconexiunii între două sisteme, se pot cerceta în special condițiile noi în care funcționează unul din sisteme, prin cercetarea fenomenelor în nodurile sale principale și în nodurile sale la frontiera dintre cele două sisteme etc. În asemenea situații, poate fi interesant ca sistemul exterior, ce se va interconecta, să figureze simplificat (cu un nod unic pentru întreaga sarcină de exemplu).

Se mai poate observa că cu ecuațiile *analizei nodale* ca și *echivalentele tipizate* plecînd de la tensiuni aplicate, permit studii de sisteme foarte vaste pe porțiuni. Se vor face tăieturi de-a lungul nodurilor unde pot fi considerate anumite tensiuni aplicate sau injecții de puteri și separa astfel sistemul vast, în sisteme mici, pentru examinarea unor anumite probleme de structură sau funcționare.

III. Obținerea schemelor *REI* și a imaginilor nodale simultan cu calcule curente

Conceptele și procedeul arătat mai sus sînt interesante în special pentru stabilirea unor situații fizice simple ce permit completarea calculelor cu raționamente simple. „Echivalentele" trebuie obținute de la calculatorul numeric paralel cu calculul obișnuit. Arătăm mai jos două căi:

1. 1. Obținerea *echivalentelor tip* asociată calculului curenților de scurtcircuit și a regimurilor dinamice, pornind de la un regim cunoscut.

Această cale rezultă din cele spuse mai sus la paragraful II.

Dăm mai jos, totuși cîteva lămuriri și indicații utile la întocmirea programelor pentru calculatoarele numerice;

a) Se pornește de la un prim regim pentru care s-au determinat puterile și tensiunile în toate nodurile pe o cale oarecare;

b) Eliminînd pe rînd nodurile după cum s-a arătat la punctul 6 cu procedeul de transformare a matricei $Y\left(y_{ij}\text{ nou} = y_{ij}\text{ vechi} - \frac{(y_{ik})(y_{ik})}{y_{kk}}\right)$; după o primă înlocuire a sarcinilor prin admitanțele corespunzătoare, obținem ecuațiile B din formula (13) pentru barele centrale ale nodurilor radiale (notate cu m). Operația se poate face prin procedee de economisire a calculului și a memoriei mașinii indicate deja în literatura tehnică în cazuri similare [16]. Notăm astfel că nu se înmagazinează termenii zero din matricea $[Y]$ si se pot utiliza locurile libere din memoria mașinii după ce un rînd a fost eliminat.

c) Se obţin astfel:

— curenţii de scurtcircuit trifazaţi în barele centrale ale nodurilor radiale la care sînt legate sarcini sau generatoare (notate *m*);

— toate elementele necesare reproducerii schemei *REI*, a nodului respectiv;

— imaginile nodale.

Astfel ecuaţia nodului 4, scrisă cu notaţiile ce indică natura fizică a circuitelor este

$$\bar{I}_4 = \underbrace{\bar{Y}_{41'}\,\bar{E}_{1'} + \bar{Y}_{42'}\,\bar{E}_{2'} + \bar{Y}_{43'}\,\bar{E}_{3'}}_{A} \quad \underbrace{-\,\bar{Y}_{40}\,\bar{U}_4}_{B}, \tag{22}$$

unde $1'$, $2'$, $3'$ sînt barele unde se aplică tensiuni generatoare şi corespund rîndului 1, 2, 3 din matrice iar U_4 corespunde lui V_4.

Curentul de scurtcircuit trifazat în nodul 4 notat I_{4e} poate fi obţinut:

— fie din adunarea termenilor A (dacă $\bar{U}_4 = 0$ atunci $\bar{I}_4$ este chiar curentul de scurtcircuit căutat);

— fie mai simplu observînd că aceşti termeni sînt egali din relaţia (22), cu $\bar{I}_4 + \bar{Y}_{40}\,\bar{U}_4$ sau

$$\bar{I}_{4e} = \bar{I}_4 + \bar{Y}_{40}\,\bar{U}_4 = (\bar{Y}_{44'} + \bar{Y}_{40})\,\bar{U}_4$$

sau

$$\bar{I}_{4e} = \bar{Y}_{4e}\,\bar{U}_4 \text{ (vezi formula (6))}.$$

d) Aceleaşi ecuaţii (22), dau şi admitanţele schemei *REI* şi curenţii de scurtcircuit repartizaţi pe surse ($\bar{I}_{41} = \bar{Y}_{41'}\,\bar{E}_1$ etc.)

$$\bar{I}_4 = \bar{I}_{41} + \bar{I}_{42} + \bar{I}_{43} - \bar{I}_{40} = \bar{I}_{4e} - \bar{I}_{40},$$

cu toate elementele necesare imaginii nodale (vezi conceptul 3 şi fig. 4).

e) Mai trebuie observat că *echivalentul REI final* dat de formula (12′), în care figurează de fapt numai barele notate *m′* unde se aplică tensiunile generatorilor, toate sarcinile fiind înlocuite prin impedanţe, reprezintă ansamblul de ecuaţii ce se utilizează curent în problemele de regimuri dinamice. Cu aceste ecuaţii se determină pentru diverse poziţii ale rotorilor (poziţii solidare cu faza tensiunilor *E*) puterile electrice ale generatoarelor. Aceste ecuaţii dau în acelaşi timp şi elementele schemelor *REI* şi imaginile lor nodale pentru barele fictive *m′*, unde se consideră aplicată tensiunea internă a generatorilor. *Caracterul special al acestor scheme REI, datorit faptului că şi tensiunea nodului central este o tensiune aplicată nu le micşorează interesul.* Astfel s-a arătat pentru un caz cunoscut din literatura tehnică cu 3 noduri cum se pot efectua chiar calcule complete grafice de stabilitate dinamică pe asemenea scheme *REI* ale nodurilor fictive [4], [6], [9] obţinînd cîte un foarte expresiv grafic în evantail, pentru fiecare din cele 3 noduri. Vezi calculul grafic de la lucrările [4], [6], [9].

f) O observație importantă în legătură cu obținerea echivalentelor și a imaginilor lor, în paralel cu calculul curenților de scurtcircuit sau a regimurilor dinamice este următoarea:

— se obține un maximum de informații și claritate, păstrînd ecuațiile notate cu B din (16), pentru determinarea și urmărirea mișcărilor dinamice, adică ecuațiile nodurilor reale, notate cu m (la care sînt legate generatoarele radial), iar nu cele corespunzătoare nodurilor m' interne ale generatoarelor notate cu A în formulele (16) cum se procedează în mod curent.

— Aceste ecuații (B) sînt întotdeauna suficiente pentru determinarea puterii generatorilor legați radial la nodul central respectiv (m), completate cu ecuațiile simple ale curentului din admitanța de legătură pe ramura mm' la capul căreia (m') se aplică tensiunile generatorului m.

Dacă numărul generatorilor legați radial este mai mare cu 1, aceste ecuații conduc și la minimum de operații în dezvoltarea calculului.

Aceste ecuații B permit ușor

— introducerea ușoară a efectului reglajului tensiunilor generatorilor funcție de tensiunea barei m, la care sînt legați acești generatori;

— obținerea echivalentului și a imaginii sale în nodurile reale m (iar nu în cele fictive m') cu toată gama de informații pe care o aduc;

g) O ultimă observație este că dacă se obțin echivalentele cu imaginile lor simultan cu calcule de regimuri dinamice (stabilitate de exemplu) aceste imagini cu dinamica lor în cursul regimului *înlocuiesc complet în această metodă, curbele de oscilație a rotoarelor între ele* (*swing curve*). Informațiile ce se obțin sînt însă cu totul de altă categorie ca bogăție, deoarece se „vizionează" de fapt fenomenul, cu toate aspectele lui, văzut din diverse noduri. Vezi aplicații la studiul despre: timpul de lansare [17] sau diverse studii de stabilitate dinamică, protecție etc. [2], [6], [9], [18], [19] etc. și anexă.

1.2. *Obținerea echivalentelor REI asociată cu determinarea regimurilor. Iterația curenților de scurtcircuit*

Indicăm o a doua cale, neexperimentată încă de noi, dar care ni se pare mult mai interesantă ca prima:

— se cunosc un număr de date necesare pentru determinarea regimurilor sub formele obișnuite de ex: sarcinile în toate nodurile consumatoare și repartiția puterilor pe generatoare.

Un generator (sau o sarcină) rămîne cu puterea necunoscută pentru echilibrarea pierderilor și dă nivelul tensiunilor (i se atribuie o anumită tensiune).

a) Se procedează la *o primă evaluare a tuturor admitanțelor corespunzînd sarcinilor* printr-o apreciere preliminară a tensiunii nodurilor;

b) Cu aceste admitanțe introduse în schemă se procedează la reducerea schemei pînă la *echivalentul ei final* din formula (12′), în care figurează numai barele unde se aplică tensiunile generatorilor (m');

c) Cu o metodă iterativă, considerînd datele cunoscute asupra puterilor se determină tensiunile (E) aplicate echivalentului final pentru a se respecta puterile impuse;

d) Odată determinat regimul în *echivalentul final* se face o restabilire a nodurilor eliminate şi se determină tensiunile şi puterile corespunzătoare în toate nodurile sistemului. Restabilirea se face uşor dacă s-au memorat pe rînd în maşina cifrică fiecare rînd al matricei Y pe măsură ce a fost eliminat în procesul de reducere. Pentru fiecare rînd restabilit rezultă o putere şi o tensiune pentru nodul respectiv;

e) Dacă regimul la care se ajunge astfel în întreaga reţea (corect pentru puterile generatorilor) dă diferenţe prea mari pentru puterile sarcinilor în diversele noduri, se consideră o nouă serie de admitanţe pentru sarcini, pornind de rîndul acesta de la noile tensiuni găsite în noduri. În fond, se iterează astfel cantităţile YE, de natura *curenţilor de scurtcircuit* în echivalentul final al sistemului, de aceea metoda a fost denumită *iteraţia curenţilor de scurtcircuit.*

Sînt posibile variante, utilizînd *echivalentul cu sarcină unică* dat de ecuaţia [20] asupra cărora nu ne oprim deocamdată.

★

Trebuie reţinut în legătură cu această ultimă cale:

— Ordinea în care sînt eliminate ecuaţiile are importanţă practică dacă se ţine seama de procesul de restaurare al nodurilor.

— Ultimele ecuaţii ce se elimină (ecuaţia 4 de ex. în cazul nostru din formula (10)) sînt şi cele ce se restabilesc primele. Nodurile consumatoare importante, cu sarcini mari, sau asupra cărora dorim să avem un maximum de informaţii vor fi păstrate ultimele la eliminare.

— Astfel, este posibil ca restaurarea să nu mai fie necesară decît parţial în procesul de determinare a regimurilor, dacă s-au verificat puterile în nodurile importante care singure se restabilesc.

— Ultima ecuaţie eliminată 4 de ex. din ecuaţia (12) este de fapt ecuaţia echivalentului radial pentru nodul 4. La fel din ecuaţiile *echivalentului final* se pot obţine schemele *REI* respective şi imaginile lor pentru nodurile generatoare.

— În procesul de restabilire paralel cu calculul se obţin şi ecuaţiile echivalentelor tip pentru nodurile restabilite cu toate elementele necesare dresării imaginilor.

Această cale apare ca deosebit de interesantă deoarece:

— Permite efectuarea iteraţiilor cu un număr redus de ecuaţii corespunzătoare echivalentului final.

— Chiar primul regim determinat pe echivalent conţine o serie de date exacte cu care s-au făcut iteraţiile ca: sarcina totală a sistemului, repartiţia sarcinei pe centrale etc. În multe cazuri această primă determinare este suficientă, deoarece abaterile locale ale sarcinilor pot fi acceptate dacă sarcina totală e corectă, mai ales în cercetări de perspectivă (proiectare).

— Restabilirea nodurilor se face numai dacă apare necesar şi eventual parţial. Iteraţiile sarcinilor sînt deci în general reduse.

— O dată cu terminarea calculului s-a determinat:

— echivalentul *REI* final al sistemului;

— echivalente tip (scheme *REI*) pentru o serie de noduri, cele generatoare plus cele ce se restabilesc, împreună cu bogatele informaţii pe care le conţin.

★

CĂI ÎNRUDITE

Înainte de a încheia această expunere de principiu trebuie amintită o cale nouă propusă recent de M. B. Reed, G. B. Reed, I. L. Mc. Kinley, H. K. Polk, R. V. Hugo şi W. I. Martin [21].

Calea nouă este o încercare de restructurare matematică (după cum arată autorii [21]*) fundamentală a teoriei reţelelor pentru adaptarea la calculatorul numeric.

Se ajunge la o serie de formule în care toate mărimile sistemului sînt exprimate funcţie de tensiunile aplicate şi coeficienţii determinaţi de admitanţele ce intervin în sistemul examinat selecţionaţi cu ajutorul unor matriţe de incidenţă pe care le poate forma chiar calculatorul numeric. Se regăsesc formule corespunzătoare formulelor (5), (16), (17) sau (19), (20) din acest memoriu.

Se formulează concepţii noi matematice ce îşi găsesc corespondentul în sistemele echivalente fizice propuse aci ca:

— conceptul lui „Daisy Equivalent" din memoriul „Reed" corespunde *schemei REI*;

— conceptul „Generatorului Daisy" din propunerea „Reed" corespunde *echivalentului REI final* al sistemului din acest memoriu.

În sfîrşit, există o concepţie a „zonificării" care are multe înrudiri cu conceptul 4 expus aici. Aceste concluzii identice apar cu atît mai interesante cu cît punctele de plecare şi căile de raţionament sînt fundamental diferite şi anume:

— Conceptele „Reed" caută o restructurare fundamentală matematică adaptată calculatorului numeric.

— În *analiza nodală* am căutat un echivalent fizic simplu şi tipizat, cu posibilităţi de aplicaţie generalizat pentru reintroducerea unui raţionament comod paralel cu bogatele operaţii ce pot fi efectuate cu calculatorul numeric.

Formulele finale „Reed" permit obţinerea *echivalentelor tip* stabilite de noi şi a *imaginilor nodale*.

★

IV. CONCLUZII

Asocierea calculatorului numeric studiilor de reţele dă posibilităţi cu totul noi calculului propriu-zis. Laboriozitatea operaţiilor pare să

*) p. 221.

dispară ca problemă. În schimb, întinderea mereu crescîndă a sistemelor electroenergetice şi complexitatea lor în soluţia modernă cu tendinţă de interconectare generalizată pun cercetătorilor probleme practice de o mare complicaţie, în care raţionamentele devin de multe ori imposibile.

Pare necesară o restructurare a sistemului de a gîndi, întinderea obiectivelor şi natura lor complexă excluzînd raţionamente unitare pe ansamblu considerînd sistemul energetic real. Experienţa cîştigată cu *analiza nodală* utilizînd curenţii de scurtcircuit, în soluţia sa grafică, cu analize pe noduri [1—31], care a dat rezultate deosebite în ceea ce priveşte raţionarea fenomenelor [1, 2, 3, 9, 12, 13, 14, 15 etc.] a fost extinsă tocmai pentru a corespunde acestui nou imperativ. Ea este utilizată asociat cu calculatorul numeric cu care se efectuează calculele. S-a ajuns astfel la o nouă structură a *analizei nodale* utilizînd curenţii de scurtcircuit, a cărei principii au fost expuse în prezentul memoriu şi care are următoarele caractere esenţiale:

1. *Un echivalent tip* este utilizat generalizat la examinarea oricărei probleme şi obţinut în orice punct (nod, bară etc.) al sistemului. Se utilizează astfel o singură structură topologică, simplă:

Schema radială care alcătuieşte *echivalentul tip* pentru orice punct (echivalentul *REI*).

2. *O imagine tipizată* şi ea, bazată pe curenţii de scurtcircuit cu componentele lor în punctul pentru care s-a stabilit echivalentul tip, permite o reprezentare completă a fenomenelor „văzute" prin nodurile sistemului. Stările staţionare sau dinamice ale sistemului pot fi astfel studiate simplu pe asemenea imagini (1—13 şi anexa).

Această imagine tipizată înlocuieşte graficele de diverse tipuri utilizate azi pentru stabilirea dependenţelor dintre mărimi şi raţionarea fenomenelor. Chiar şi curbele unghiurilor relative utilizate azi generalizat în studiile de stabilitate dinamică, sînt înlocuite astfel de graficele „în evantail" alcătuite de imaginile tipizate, care dau un mare număr de informaţii.

3. *Calculatorul numeric* este utilizat pentru obţinerea schemelor tip *REI* şi a curenţilor de scurtcircuit ce intervin în imagini. După cum am văzut, în rîndurile matricelor finale (vezi formula matricială (13)), obţinem:

— prin identificarea coeficienţilor: admitanţele schemei echivalente tipizate (*REI*);

— prin explicitarea termenilor yV (care sînt componentele curenţilor de scurtcircuit) mărimile necesare imaginilor nodale corespunzătoare.

4. *Studiul sistemelor electroenergetice cuprinde astfel o parte nouă* cu mari posibilităţi ce se adaugă celor cunoscute pînă acum şi care se obţine cu eforturi neînsemnate în plus pentru calculatorul numeric. Determinării unui regim i se adaugă şi explicitarea *echivalentului final* sau a echivalentelor sistemului de diverse tipuri după caz (de ex. cu sarcină unică).

Din echivalentul final, corespunzător unui singur regim se pot deduce apoi *echivalentele nodale* (schemele *REI*) prin revenirea la nodurile eliminate. Curenții injectați sînt restabiliți pentru noduri în locul admitanțelor pe care le traversează aceiași curenți în echivalentul final.

5. *Astfel se obțin schemele REI pentru toate nodurile interesante, dintr-un singur regim*, sau chiar simultan cu calculul acestui regim. Ecuațiile corespunzătoare ce se obțin pentru aceste scheme *REI*, nu mai presupun însă relații liniare între curent și tensiune pentru nodul pentru care s-a stabilit echivalentul (ecuațiile *B* din formula (13)).

6. Astfel, pe aceste scheme echivalente tipizate (*REI*) există o libertate totală de variație pentru mărimile ce apar în nod (tensiune, curent, faze etc.). Acest fapt permite examinarea posibilităților nodului respectiv pe schema *REI* și imaginea sa, fără calcul, și în alte numeroase regimuri decît cel din care au fost deduse (cu singura restricție a liniarizării sarcinilor exterioare nodului). Astfel de studii pot fi întreprinse de exemplu pe un „analizor grafic" cu mărimile imaginii deduse cu calculatorul numeric [12], [22].

7. *Mărimile necesare schemelor REI și imaginilor lor, pot fi obținute după cum am văzut cu aceleași programe*, cu care se obțin curenții de scurtcircuit, regimurile dinamice sau chiar regimurile în general (vezi 12).

8. *O ultimă observație în legătură cu posibilitățile totale de automatizare a calculului* care apare ca perspectivă pentru această cale. Analizorul grafic combinat cu calculatorul numeric, poate conduce la o urmărire exclusivă a fenomenelor și rezultatelor pe imagini de noduri reale (sau fictive) cu posibilități de obținere directă a imaginilor pentru regimuri staționare sau dinamice, ocolind examinarea cifrelor numeroase ce apar ca rezultate în asemenea probleme.

★

În anexă se văd aspectele *imaginilor nodale* prin care sînt vizionate stările unui sistem. În studiu în continuare se vor arăta rezultatele ce se obțin în ceea ce privește problemele de structură a sistemului, judecate pe *echivalente REI finale* sau echivalente *REI* de diverse tipuri ale sistemului, cu referire specială la problema pierderilor.

ANEXĂ

STĂRILE UNUI SISTEM „VĂZUTE" PRIN TOATE NODURILE SALE. IMAGINI NODALE

Vom arăta mai jos cîteva aspecte care pun în lumină avantajele esențiale ale utilizării generalizate a imaginii tip a nodului (cenceptul III) pentru raționament [22] — [34].

1. Regimuri staţionare

Cazul 1. *Toate sarcinile sistemului sînt reprezentate de impedanţe inclusiv sarcina nodului reprezentat*

În acest caz (vezi formula (7)) curentul de scurtcircuit total al nodului $\bar{I}_{ie}$ variază ca fază şi mărime ca tensiunea nodului $\bar{U}_i$ şi se utilizează graficul simplu din figura 4 *a*

$$\bar{I}_{ie} = \bar{Y}_{ie}\,\bar{U}_i = \bar{I}_{i1} + \bar{I}_{i2} + \bar{I}_{i3} + \dots$$

unde I_{i1}, I_{i2}, ... sînt curenţii de scurtcircuit corespunzători ramurilor schemei *REI*, repartizaţi pe generatorii reali (1, 2, 3 etc.).

Dacă se schimbă tensiunile aplicate schimbăm şi aceşti curenţi de scurtcircuit în mod corespunzător.

Dacă $\bar{Y}_{ie}$ se schimbă, se schimbă scara lui $\bar{U}_i$ pe grafic şi faza sa. Graficul se transformă uşor, căutînd poziţia nouă a fiecărui curent de scurtcircuit $\bar{I}_{i1}$, $\bar{I}_{i2}$ ... etc. şi poziţia lui $\bar{I}_{ie}$ care dă noua tensiune (vezi studiul timpului de lansare [17]).

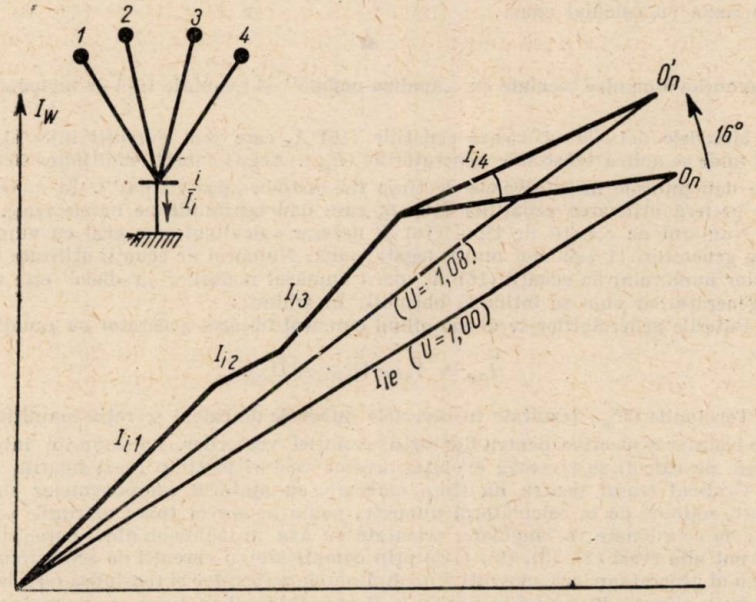


Fig. 10. — Variaţia fazei rotorului generatorului 4 cu 16° conduce la o variaţie a tensiunii cu 8% în nodul *i*. Tensiunea se măsoară ca mărime şi fază cu vectorul I_{ie}.

Figura 10 arată două stări rezultate în nodul *i* în urma schimbării fazei (încercării) unuia din generatorii din sistem.

Cazul 2. *Sarcina nodului reprezentat păstrează o lege de variaţie oarecare*

În acest caz se completează graficul ca în figura 10, unde s-a figurat relaţia complimentară vezi formula (2) stabilind diferenţa celor doi curenţi de scurtcircuit $\bar{I}_{ie}$ şi $\bar{I}_{i0}$

$$\bar{I}_i = \bar{I}_{ie} - \bar{I}_{i0}.$$

Pe acest al doilea grafic tensiunea nodului va fi măsurată cu vectorul $\bar{I}_{i0}$ la scara dată de admitanța $\bar{Y}_{i0}$

$$\bar{I}_{i0} = \bar{Y}_{i0}\,\bar{U}_i .$$

Se poate studia prin variația mărimilor pe grafic

— dependența dintre curentul de sarcină al nodului ($\bar{I}_i$) și tensiunea ($\bar{U}_i$) în diverse ipoteze pentru tensiunile aplicate. În această ipoteză variază vectorii $\bar{I}_{i0}$ și $\bar{I}_i$;

— dependența dintre curentul de sarcină al nodului ($\bar{I}_i$) și oricare din tensiunile aplicate sistemului (vectorii $\bar{I}_{im}$), în ipoteza menținerii tensiunii nodului (măsurată de $\bar{I}_{i0}$) constantă. În această ipoteză se menține constant vectorul $\bar{I}_{i0}$ și se variază vectorii $\bar{I}_{im}$, căutîndu-se rezultatul asupra curentului din nod $\bar{I}_i$. Reamintim că proiecțiile pe cele două axe ale acestui curent dau puterile active și reactive corespunzătoare;

— dependența dintre tensiunea nodului (măsurată de $\bar{I}_{i0}$) și tensiunile generatorilor (măsurate de vectorii $\bar{I}_{im}$), în diverse ipoteze pentru curentul de sarcină ale nodului ($\bar{I}_i$) etc.

Se vede din cele de mai sus posibilitățile cu totul deosebite de analiză a infinităților de situație ce pot rezulta în nodul i [3]. Situațiile raționate pe imaginile nodale, se verifică dacă este cazul cu calculul exact.

★

II. Regimurile dinamice studiate cu „analiza nodală" și avantaje față de metodele curente

1. Metodele actuale utilizează ecuațiile (16) *A*, care dau curenții injectați în barele fictive m' unde se aplică tensiunile generatorilor ($\bar{E}_{m'}$). Acești curenți multiplicați cu tensiunile respective dau puterile în intervalele de timp (în metoda „pas cu pas"). În metoda *analizei nodale* se preferă utilizarea ecuațiilor (16) *B*, care dau tensiunile pe barele reale.

2. Numărul de ecuații de tipul (16) *B* necesar calculului este egal cu numărul nodurilor ce au generatori (1 sau mai mulți) legați radial. Numărul de ecuații utilizate (16) *B* este deci inferior numărului de ecuații (16) *A* dacă numărul nodurilor „radiale" este inferior numărului generatorilor cum se întîmplă obișnuit. În schimb:

3. Puterile generatorilor se deduc aflînd curentul fiecărui generator cu ecuația auxiliară

$$\bar{I}_{mg} = \bar{Y}_{mm'}\,(\bar{E}_{m'} - \bar{U}_m).$$

4. Tensiunile ($\bar{E}_{m'}$) rezultate în diversele intervale de calcul se reții înmulțite cu admitanțele de transfer respective pentru figurarea evoluției vectorilor. La anumite intervale (mai rare ca cele de calcul) se trasează evoluția acestor vectori în timp (vezi figurile 12, 13, 14).

5. Graficul trasat pentru un timp oarecare, cu ajutorul componentelor curenților de scurtcircuit, reținuți de la calculatorul numeric, poate da direct toate mărimile prin trasarea sistemului de coordonate rectangulare, orientate cu axa ordonatelor după curentul activ [3].

Se pot afla (vezi (3), (5), (9), (12)) prin completare cu curenții de scurtcircuit în gol ai nodului sau ai generatoarelor cunoscuți din admitanțele respective și tensiunea nodului respectiv, toate mărimile văzute din nodul respectiv în fiecare interval de timp, cu participarea fiecărui generator în evoluția fenomenului.

6. Mișcările acestor vectori care sînt adevărați reprezentanți ai rotoarelor respective dau informații complete asupra regimului dinamic și rolul fiecărui generator, și pot fi utilizate în probleme și studii cu totul speciale de reglaj, stabilitate etc. (vezi exemplul [17]).

7. Introducerea reglajului de tensiune se face ușor deoarece apar explicit tensiunile ($\bar{U}_i$) barelor la care sînt legate radial generatoarele, tensiuni care sînt chiar mărimile de intrare în ecuațiile de reglaj. Se completează programul acolo unde este cazul cu ecuațiile de legătură între tensiunile barelor reale ($\bar{U}_i$) și a barelor fictive interne ale generatoarelor ($\bar{E}_{i'}$).

8. Graficul în „evantail" arată deplasarea rotorilor în timp, asociată cu o mare bogăție de informații. Se pot căpăta și aspecte generale, asupra evoluției fenomenului, reprezentat unitar, pentru o cît mai ușoară sesizare a aspectelor particulare. Astfel reproducem cele 3 grafice „în evantail" obținute de ing. Persida Iancovici (ISPE) din figura 14, în cazul unor fenomene dinamice prilejuite de un scurtcircuit eliminat pe linia de legătură 1—2 din

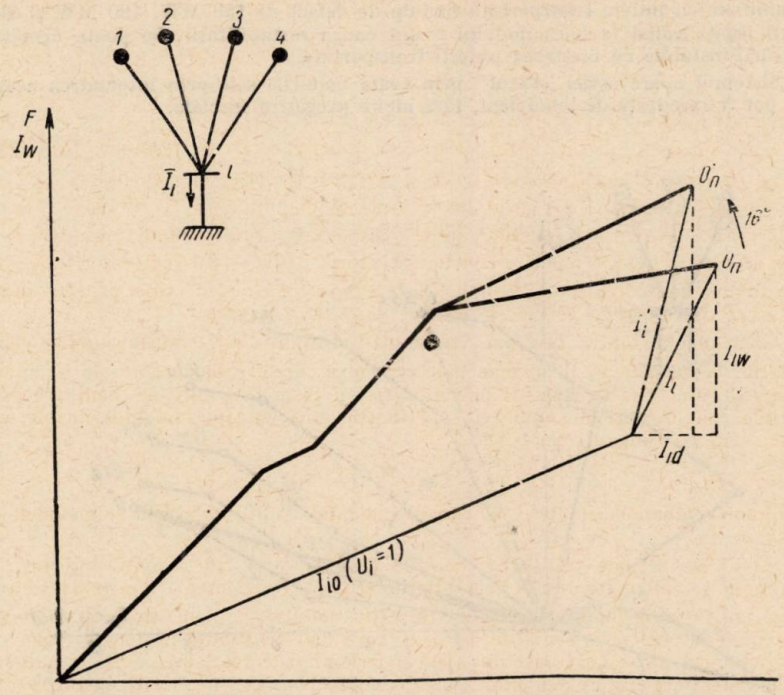


Fig. 11. — Aceeaşi variaţie a fazei rotorului generatorului cu 16° ca în figura 10. Curentul de sarcină I după rotire, citit pe grafic corespunde cazului în care tensiunea U_i (măsurat de I_{i0}) nu variază. S-au determinat astfel condiţiile ce trebuie impuse curentului I pentru menţinerea tensiunii U_i constantă.

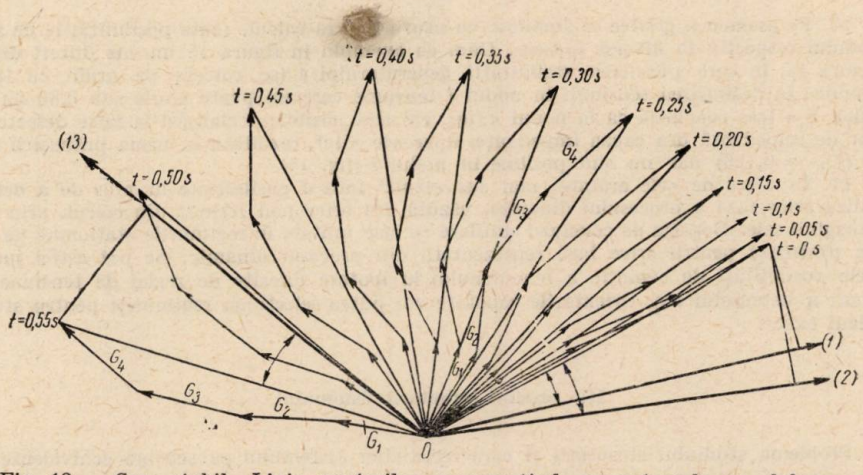


Fig. 12. — Caz stabil. Linia vectorilor reprezentînd generatoarele se deformează la timpul 0,3—0,35 secunde dar îşi revine la 0,55 secunde. Calcul executat de P. Nicolae — Institutul de energetică al Academiei R.P.R.

schemă. Imaginile nodului 1 au fost reproduse numai după reanclanşarea la 0,6 secunde. (3 cazuri examinate cu putere transportată înainte de defect de 150 MW, 180 MW şi 200 MW). Generatorii legaţi radial la bara nodului 2 sînt cauza instabilităţii. Se poate urmări accelerarea mişcării instabile cu creşterea puterii transportate.

9. Sistemul apare astfel „văzut" prin toate nodurile sale prin întocmirea acestor grafice, care pot fi executate de tehnicieni, fără nici o pregătire specială.

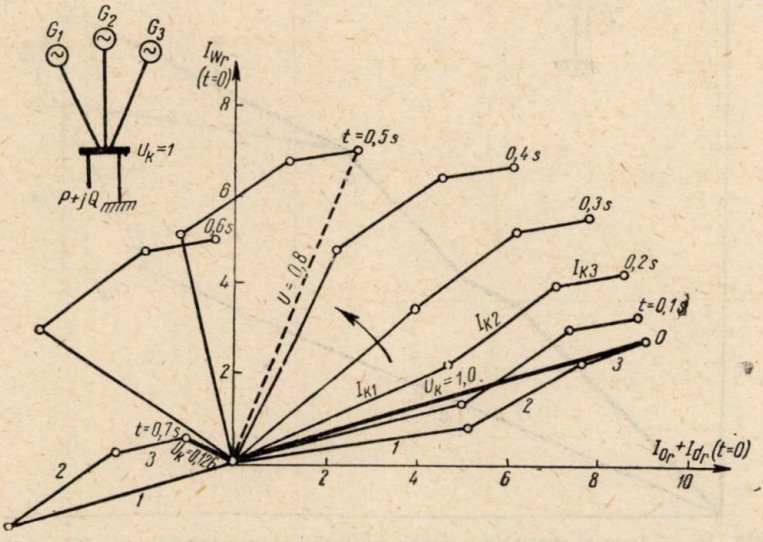


Fig. 13. — Caz instabil văzut din nodul K. Tensiunea nodului K trece de la 1 la 0,126 la 0,7 secunde. Extras din studii executate de L. Groza şi M. Bogan (ISPE).

10. Pe asemenea grafice se stabilesc cu uşurinţă fără calcul, toate posibilităţile de stări ale nodului respectiv în diverse ipoteze. Dăm ca exemplu în figura 15 un caz diferit de cel din figura 14, în care pierderea stabilităţii generatorului 4 (se roteşte pe grafic cu 180°), nu conduce la prăbuşirea tensiunii în nodul i tensiune care nu poate scade sub 0,86 (la 0,6 secunde). S-a tras concluzia că în nodul k (fig. 13) sînt posibile declanşări la false defecte ale releelor de impedanţă din cauza impedanţei aparente mici, rezultată în urma prăbuşirii tensiunii ($U_k = 0{,}126$) dar nu sînt posibile în nodul i (fig. 15).

11. În afară de cele arătate mai sus rezultă încă o posibilitate în plus de a detalia şi analiza orice fază a procesului dinamic, văzută din orice nod reţinut din calcul, prin studiul imaginii sale. Bogăţia de concluzii similare cu cele arătate în regimurile staţionare de mai sus, se păstrează pentru orice fază reprezentată din procesul dinamic. Se pot astfel judeca bogatele posibilităţi de evoluţie a fenomenului în ipoteze diferite de reglaj de tensiune, de structură a sistemului etc. Orientările căpătate vor putea selecţiona regimurile pentru studiu cu calcul exact.

III. Studiul structurii sistemului

Problema studiului structurii şi caracteristicilor sistemului pe scheme echivalente tip cu imagini reprezentative a făcut obiectul unei singure publicaţii [8] în care s-au arătat drumurile noi pe care le deschide această cale, cu referire specială la *formula pierderilor.*

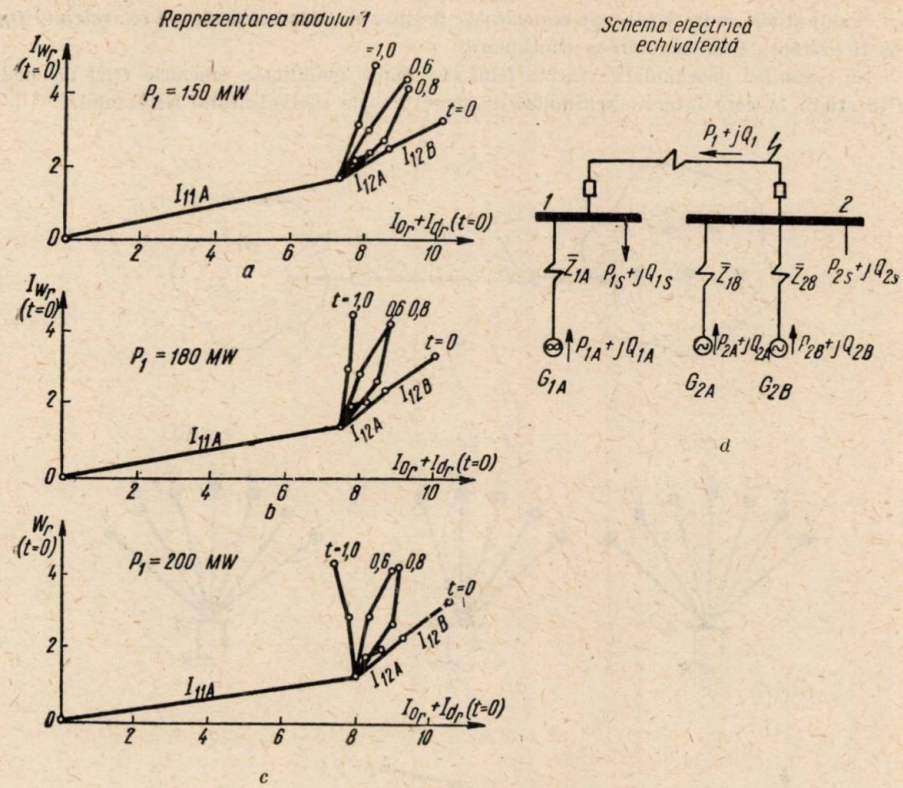


Fig. 14. — Regimurile „văzute" din nodul 1 la timpurile 0,6, 0,8 şi 1 secundă, după reanclanşarea liniei cu defectul eliminat.

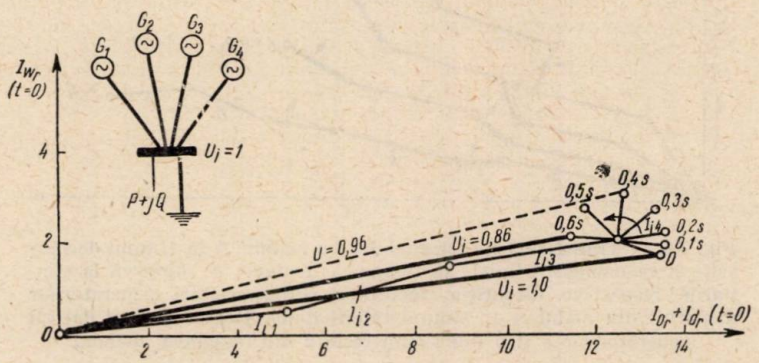
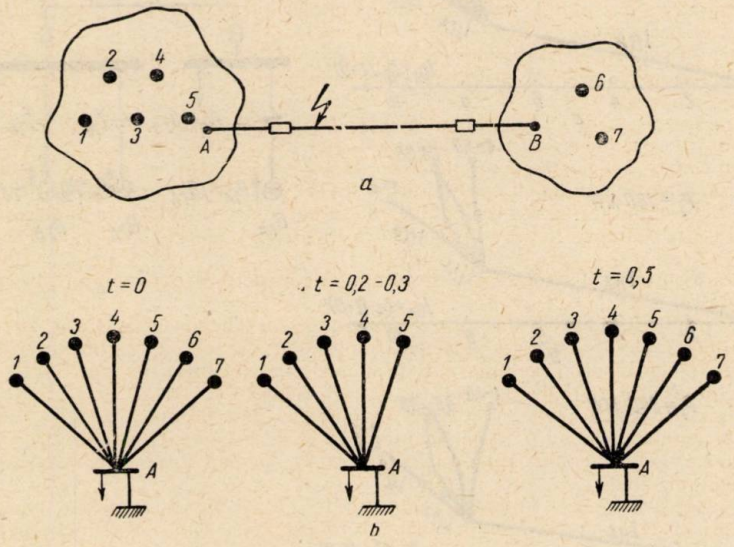


Fig. 15. — Nod în care nu sînt posibile declanşări la „false defecte" ale releelor de impedanţă în cazul pierderii stabilităţii generatorului 4. Extras din studii întocmite de G. Moraite (ISPE) şi M. Gheorghiu (Inst. politehnic, Bucureşti).

Aceste studii se întreprind pe *echivalentele* arătate ale sistemului sau pe *echivalentul final* şi vor fi prezentate în lucrarea în continuare.

Ne rezumăm deocamdată a arăta felul cum apar modificate schemele *REI* ale nodurilor în studii în care intervin schimbări de structură ale echivalentului sistemului.



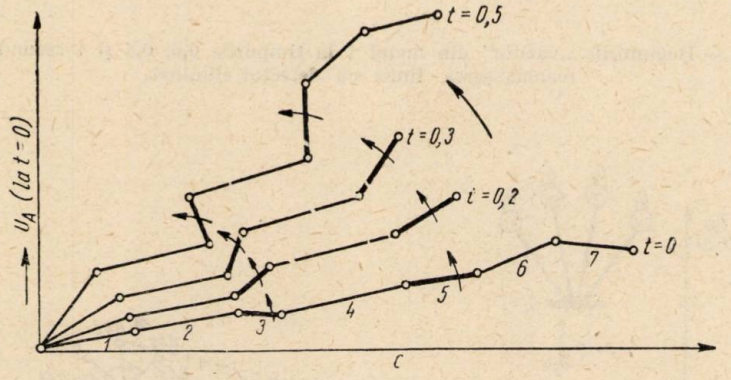


Fig. 16. — Transformările schemei *REI* a nodului *A* în timpul declanşării şi reanclanşării liniei. În imaginea nodului se observă la timpurile respective dispariţia vectorilor corespunzători generatorilor dispăruţi din nodul *A* în timpul tăierii liniei. Regim instabil datorit generatorilor 3 şi 5 după cum rezultă din imaginea nodală.

În figura 16, s-a figurat schema *REI* a nodului *A* în diversele intervale de timp în care structura sistemului se schimbă din cauza declanşării liniei *A — B*. La separarea liniei, în nodul *A*, schema *REI* pierde cei doi vectori aferenţi centralelor din sistemul *B*.

CONCEPTS ET PROCÉDÉS DE L'« ANALYSE NODALE » ASSOCIÉS AUX CALCULATEURS NUMÉRIQUES

RÉSUMÉ

Les nouvelles possibilités des calculateurs numériques conduisent à une restructuration des concepts et des procédés.

— Dans « l'analyse nodale » on associe à toute étude, *un schéma équivalent* (*REI*), qui remplace pour le nœud le schéma tout entier. Ce schéma équivalent résulte des courants de court-circuits séparés par sources.

On dresse également un diagramme typisé, dénommé « l'image du nœud », qui donne une représentation des grandeurs et phénomènes vus par le nœud respectif.

— On constitue également «*l'équivalent du système* » *tout entier*, qui est un bloc unitaire d'admittances, à partir duquel on peut détacher les schémas REI typisés.

— La détermination de ces cas équivalents à l'aide des calculateurs numériques conduit à un certain ordre des opérations, en partant des équations nodales :

$$[I] = [Y][V].$$

— Les avantages d'associer à toute étude une structure topologique type, d'un caractère élémentaire, sont :

1. Les problèmes sont réduits au cas élémentaire du schéma radial. Ce cas est bien connu par les électriciens, et comporte des procédés simples d'étude, toujours les mêmes.

2. Une image typisée, représente de la même manière, dans tout problème, les phénomènes — ce qui assure de riches possibilités de réflexions.

3. Les structures les plus vastes et compliquées sont décomposées par des coupures, par les nœuds, en plusieurs systèmes élémentaires. Ces derniers sont étudiés séparément ou interconnectés, à l'aide des équivalents, qui, à leur tour, peuvent être interconnectés pour reformer le système primitif.

Le procédé peut être étendu aux problèmes les plus complexes, comme, par exemple, la formule des pertes de circulation. Ces problèmes seront exposés dans des études séparées, la présente étude ayant pout but en principal de fixer les concepts et les procédés mathématiques, en vue de l'obtention des équivalents.

BIBLIOGRAFIE

1. P. Dimo, *O nouă cale pentru aprecierea stabilităţii*. St. cerc. energ., *1* (1955).
2. — *Aplicarea metodei consumatorului unic la studiul stabilităţii dinamice*. St. cerc. energ., *3* (1956).
3. — *Analiza sistemelor electroenergetice prin separarea nodurilor*. Edit. tehnică, Bucureşti, 1959.
4. — *Analiza nodală, utilizînd curenţii de scurtcircuit în cazul reţelelor complexe*. Energetica *8*, 349—359 (1960).
5. — *Principiul suprapunerii efectelor. Cale unitară pentru analiza sistemelor electroenergetice*. Electrotehnica, *3*, 113—117 (1961).
6. P. Dimo, G. Moraite, *Analiza unui sistem electroenergetic complex cu 4 centrale*. Energetica **9**, *3*, 81—93 (1961).
7. P. Dimo , *Analiza nodală combinată cu calculul numeric*. Energetica, *1* şi *4* (1962).
8. — *Formula pierderilor şi optimizarea schemelor şi regimurilor pe un drum nou*. Aplicarea Analizei „nodale". Energetica **10**, *6* (1962).
9. П. Димо, *Узловой метод с использованием токов короткого замыкания в случае комплексных цепей*. Бюллетень научной информации (серия математики, физики, химии и технических наук) Академия РНР, Румыно-Советский научный институт *2* (1961).
10. P. Dimo, *L'analyse des réseaux par la méthode nodale*. Revue Générale de l'Electricité, *3* (1962).
11. — *Применение узлового метода векторов токов короткого замыкания для графического анализа режимов электро-энергетических систем*. „Электричество", *8*, август 40, 1962.

12. P. DIMO, *L'analyseur graphique*, CIGRÉ, Rapport *302* (1958).
13. — *Etude de la stabilité statique par la méthode nodale*. Revue Générale de l'Electricité, *11* (1961).
14. HOCKMAN, TOALSTON, HARKER, *Loss Formula Determination by a new method*. Power Apparature and Systems, February, 1961.
15. L. KIRCHMAYER, *Economic operation of Power Systems*. Chapman & Hall Ltd., London, 1958.
16. L. J. RINDT, R. W. LONG, R. T. BYERBY, *Transient Stability Studies*. Power Apparatus and Systems, 1960.
17. P. DIMO, *Le temps de lancer d'un réseau*. Revue Générale de l'Electricité, *12* (1960).
18. A. ROTMAN, *L'analisi nodale e la sua applicazione ai problemi delle reti elettriche*. L'Elettrotecnica, **XLIX**, *10* (1962).
19. G. MORAITE, M. GHEORGHIU, *Considerații asupra acționării la „false defecte" a protecției de distanță datorită fenomenului de pendulare a rotoarelor generatoarelor*. Energetica, *7*, 276—280 (1962).
20. E. ARIE, P. NICOLAE, *Comparație către diverse tipuri de scheme echivalente*. Energetica, *6* (1958).
21. REED-REED, MC. KINLEY, POLK, HUGO-MARTIN, *Digital Approach to Power Systems*, June, 1961.
22. P. DIMO, *The graphic analyser based on the use of short-circuit currents*. Conférence Internationale des Grandes Réseaux — CIGRÉ, Rapport *302* (1958).
23. — *Графический метод определения статической устойчивости в узловых точках*. „ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ" электрические станции, сети и системы. Режимы энергосистем, Реферат 46, 1962.
24. — *The optimisation of test conditions for the determination of the parametres of a network*. CIGRÉ, Rapport *314* (1962).
25. F. MANEA, *Studiul comparativ al unei noi căi de apreciere a stabilității*. St. cerc. energ., *1—2* (1955).
26. D. MARTAC, *Considerații asupra stabilității, dedusă prin întrebuințarea analizorului de rețele propus de ing. P. Dimo*. Energetica, *12* (1956).
27. L. GROZA, G. MORAITE, AL. ITOAFĂ, *Determinarea prin încercări pe viu a comportării unei rețele electrice la fenomene dinamice și comparare cu valori calculate prin procedeul Dimo*. Energetica, *5*, 211—220 (1958).
28. AL. ITOAFA, *Comparație între metoda „Analizei grafice" și metodele clasice în probleme de stabilitate statică*. St. cerc. energ., *3*, 503—528 (1959).
29. L. GROZA, *Utilizarea calculatorului numeric și a metodei separării nodurilor, în probleme de stabilitate și reglaj*. Energetica, *7*, 298—311 (1960).
30. L. GROZA, G. MORAITE, *Considerații asupra stabilității statice dinamice și a reglajului cu ajutorul compensatoarelor în sistemul energetic interconectat al R.P.R.* 27—32.
31. G. MORAITE, *Măsuri de îmbunătățire a protecției prin relee, rezultate din analiza regimurilor dinamice provocate de avarii caracteristice*. Energetica, *1* (1963).
32. E. ARIE, S. IONESCU, P. NICOLAE, M. POMÎRLEANU, *Studiul regimurilor statice și dinamice ale unei legături slabe de interconexiune*. St. cerc. energ., **X**, *4*, 797—817 (1960).
33. S. IONESCU, M. POMÎRLEANU, *Introducerea efectului reglajului automat*. St. cerc. energ., *1*, 181—201 (1961).
34. L. GROZA, M. BOGAN, B. UNGUREANU, *Folosirea mașinilor electronice la rezolvarea problemelor de rețele*. Energetica, *1*, 356—358 (1961).

CARACTERISTICI ALE SISTEMELOR ELECTROENERGETICE PENTRU CALCULUL INDICILOR DE CALITATE AI REGLAJULUI FRECVENŢEI ŞI TENSIUNII*)

DE

ECATERINA ARIE

621.311.183 : 621.316.72

Complexitatea sistemelor electroenergetice moderne în care intervin sute de generatoare, fiecare cu regulatoarele respective, care se influenţează reciproc şi sînt influenţate şi de regimurile şi caracteristicile consumatorilor, impune utilizarea în calcule a unor scheme simplificate.

O simplificare maximă este admisibilă în studiul calităţii reglajului [1], [2] admiţîndu-se erori pînă la 10% la determinarea abaterilor medii sau medii pătratice ale mărimilor reglate, deoarece:

— aceste erori raportate la abateri în regim normal ale tensiunii şi frecvenţei faţă de valoarea nominală, reprezintă erori de circa 1% din valoarea tensiunii şi circa 0,1—0,2% din valoarea frecvenţei;

— variaţiile probabile ale sarcinii care produc variaţiile frecvenţei şi tensiunii, nu pot fi determinate cu o precizie mare;

— daunele datorite abaterilor tensiunii şi frecvenţei de la valoarea nominală sînt încă puţin cunoscute dar nu vor putea fi determinate niciodată cu o mare precizie, fiind şi ele mărimi statistice.

Determinarea experimentală a parametrilor schemei reclamă de asemenea simplificarea acesteia, deoarece cu cît numărul parametrilor determinaţi dintr-o experienţă creşte, cu atît precizia corespunzătoare fiecărui parametru în parte, scade.

*) Lucrare susţinută în sesiunea ştiinţifică a cadrelor didactice din Electrotehnică— 17—18 dec. 1962 — Bucureşti.

S-au studiat în lucrarea de față, simplificările admisibile pentru sistemul electroenergetic format din grupuri generatoare echipate cu regulatoare de viteză și de tensiune, rețele și receptoare de energie electrică. Nu a fost inclus sistemul automat de reglare a frecvenței, deoarece parametrii acestuia pot fi determinați cu precizie și chiar reglați pentru optimizarea performanțelor, astfel încît în studiul calității reglajului interesează menținerea tuturor acestor parametri în schema finală și nu includerea lor într-o schemă simplificată [6].

Toate considerentele privind efectele simplificării schemei, au fost făcute în ipoteza că sistemul funcționează fără reglaj automat al frecvenței, deoarece în acest caz abaterile frecvenței și efectul erorilor datorite parametrilor sistemului sînt maxime și deoarece în aceste condiții de funcționare se determină în general caracteristicile sistemului [7], [8], [9], [10].

1. CONDIȚII DE SIMPLIFICARE

Abaterile frecvenței și tensiunii de la valorile nominale se datoresc în regim normal, variațiilor statistice ale sarcinii, astfel că în aceste condiții de funcționare trebuie să fie valabile caracteristicile simplificate ale sistemului de funcționare.

Examinarea variațiilor statistice ale sarcinilor în sistemul electroenergetic R.P.R. [3], [4], [5], arată că media pătratică a acestora în intervale de circa 10 minute, nu depășește în general 10% pentru sarcini locale, respectiv 1% pentru sarcina rezultantă a sistemului. Într-un sistem stabil, variațiile statistice ale puterilor debitate de generatoare vor avea abateri medii pătratice de același ordin de mărime. Între aceste limite este posibilă liniarizarea ecuațiilor de funcționare ale generatoarelor. Datorită intervenției reglajului secundar astatic al frecvenței rezultă că numai domeniul amintit interesează în studiul indicilor de calitate ai reglajului frecvenței și puterilor de schimb. Studiul reglajului tensiunii și al puterilor reactive de schimb va permite însă liniarizarea ecuațiilor mașinilor sincrone numai pentru studiile dinamice, studiile statice necesitînd și utilizarea unor caracteristici neliniare [11], [12].

În studiul sistemului presupus liniar, dinamica perturbațiilor ce acționează asupra sistemului poate fi descrisă de funcția de autocorelație a variațiilor sarcinii. Un studiu teoretic [3] pe un model probabilistic, precum și cîteva determinări experimentale [4], [5] ne permit să admitem că în general expresia funcției de autocorelație a variațiilor statistice ale puterii cerute de un consumator complex este de forma

$$\mu_x(\tau) = \sigma_x^2 \sum_k a_k^2 \, e^{-\alpha_k \tau} \cos \frac{2\pi}{T_k} \tau, \tag{1}$$

$$\sum_k a_k^2 = 1.$$

Constantele de timp $\frac{1}{\alpha_k}$ variază între 2—3 secunde și cîteva minute, iar pentru perioadele T_k se întîlnesc mai frecvent valori cuprinse în domeniile 15—25 s, 40—80 s, 120 s.

Dacă unui sistem liniar cu funcția de transfer $F(p)$ i se aplică o mărime de intrare statistică staționară, avînd funcția de autocorelație

$$\mu_x(\tau) = \sigma_x^2 \sum_k a_k^2 \, e^{-\alpha_k \tau} \cos \omega_k \, \tau = \mathcal{R}eal \, \sigma_x^2 \sum_k a_k^2 \, e^{z_k \tau}$$

unde

$$z_k = -\alpha_k + j \, \omega_k,$$

funcția de autocorelație a mărimii de ieșire, rezultă [4], [5]

$$\mu_y(\tau) = \mathcal{R}eal \, \sigma_x^2 \left\{ \sum_k a_k^2 \, F(z_k) \, F(-z_k) \, e^{z_k \tau} + \sum_j \left(\sum_k \frac{2 z_k a_k^2}{\nu_j^2 - z_k^2} \right) F(-\nu_j) Y_j \, e^{\nu_j \tau} \right\}, \tag{2}$$

unde

$\sum_j Y_j \, e^{\nu_j \tau}$ — este originalul funcției de transfer $F(p)$.

Am folosit relația (2), deoarece în ipoteza admisă, permite efectuarea studiului direct cu ajutorul funcției de autocorelație, fără a se mai recurge la analiza spectrală. Relația de mai sus arată că pentru ca simplificarea funcției de transfer a sistemului să fie corectă, ea trebuie să conducă la o funcție pondere care să aproximeze funcția pondere reală și totodată să conducă la valori apropiate de cele reale, pentru funcția de transfer, în domeniul $p = z_k$ unde z_k sînt valorile ce apar în expresia complexă a funcției de autocorelație a mărimii de intrare x. Mărimea x va cuprinde atît componente datorite perturbațiilor exterioare, cît și componente datorite reacției altor sisteme ce se interconectează cu cel a cărui simplificare se studiază; z_k va parcurge deci domeniul pulsațiilor complexe ale funcției de autocorelație al sarcinii cît și acela al pulsațiilor proprii ale unui sistem electroenergetic. Acest din urmă domeniu include și polii funcției de transfer a sistemului considerat.

Examinarea corespondenței dintre funcțiile de transfer face de aceea inutilă examinarea și a corespondenței dintre funcțiile pondere (reală și simplificată).

2. REGLAJUL FRECVENȚEI ȘI PUTERILOR ACTIVE

Într-o primă aproximație s-a considerat că frecvența este o mărime caracteristică pentru întregul sistem, adică valoarea ei este aceeași în toate nodurile sistemului; de asemenea, s-a neglijat efectul variațiilor

de tensiune. Efectul variațiilor de fază și al variațiilor de tensiune asupra reglajului frecvenței și puterilor active este analizat în capitolul 5 al lucrării.

Cu ipotezele adoptate, simplificarea maximă a schemei unui sistem electroenergetic constă în reducerea la un generator echivalent și o sarcină echivalentă; cea mai simplă ecuație caracteristică ce poate fi adoptată pentru această schemă, este [8]

$$[Tp - f_v(p) + \alpha]v(p) + \frac{\pi(p)}{P_n} = 0, \tag{3}$$

unde

v — valoarea relativă a abaterii vitezei (frecvenței) de la valoarea nominală;

π — perturbația raportată la o putere de bază oarecare;

T — constanta de inerție a generatorului raportată la puterea nominală în secunde (timpul de lansare);

f_v — funcția de transfer a regulatorului de viteză;

α — constanta de autoreglaj a sarcinii (în realitate, o dată cu fluctuațiile sarcinii, coeficientul de autoreglaj variază în jurul unei valori medii constante);

P_n — puterea nominală, raportată la puterea de bază.

Cea mai simplă funcție de transfer a regulatorului de viteză este:

$$f_v(p) = \frac{-1}{s(1+t_v\, p)}. \tag{4}$$

Funcția de transfer a sistemului rezultă

$$F(p) = \frac{v(p)}{\pi(p)} = -K\frac{t'p+1}{(p+a)^2+b^2}, \tag{5}$$

cu

$$K = \frac{1}{P_n\, T\, t_v}, \tag{6}$$

$$a = \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{T} + \frac{1}{t_v}\right) \tag{7}$$

$$b = \sqrt{\frac{\frac{1}{s} + \frac{\alpha}{2}}{T\, t_v} - \frac{1}{t_v^2} - \frac{\alpha^2}{T^2}} \tag{8}$$

În figura 1 este reprezentată această funcție pentru p real și imaginar în cazul unor valori tipice ale parametrilor schemei ($T=10$ s; $t_v = 4$s; $\alpha = 1$; $s = 0{,}05$; $P_n = 1$).

Examinarea acestor curbe arată că, deşi funcţia de răspuns tranzitoriu a sistemului la deconectarea bruscă a unei sarcini este în general practic amortizată, nu este justificată aproximarea printr-o funcţie de transfer cu un singur pol real. Încercarea de a face o astfel de aproximaţie pentru domeniul valorilor mari ale variabilei p, deci pentru porţiunea iniţială a funcţiei de răspuns tranzitoriu conduce la rezultate ce nu pot fi folosite în domeniul $|p| < 1$, al variaţiilor statistice ale sarcinii şi invers.

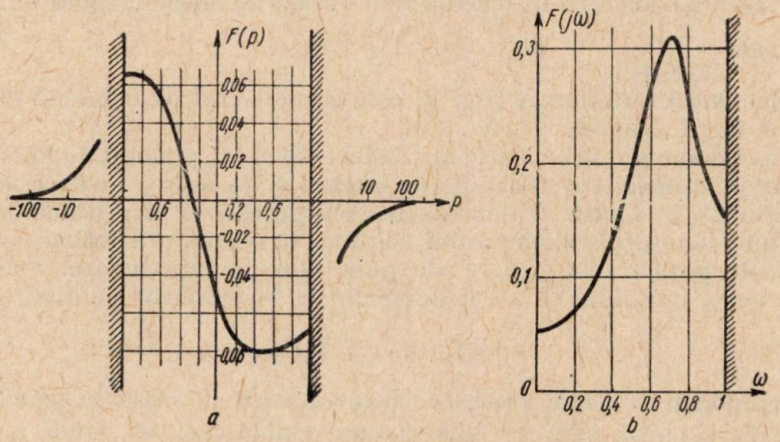


Fig. 1. — Funcţia de transfer simplificată $F(p)$ a unui sistem electroenergetic. a — în domeniul variabilei reale; b — în domeniul variabilei imaginare.

Expresia simplă din relaţia (5) a funcţiei de transfer poate fi folosită şi pentru aproximarea funcţiei de transfer a sistemului real, cu o schemă complexă. Pentru a dovedi aceasta, am analizat cîteva cazuri particulare

a. *Regulator de viteză cu statism tranzitoriu.* Funcţia de transfer a regulatorului de viteză este [13]

$$f_v(p) = \frac{-1}{t'_v p + \delta + \dfrac{mp}{1 + t_v p}}. \tag{9}$$

Funcţia de transfer a sistemului devine de forma

$$F(p) = \frac{v(p)}{\pi(p)} = -K \frac{(t'_v p + \delta)(1 + t_e p) + mp}{(1 + t_e p)[(p + a)^2 + b^2]}. \tag{10}$$

Pentru a putea aproxima această funcţie de transfer printr-o expresie de forma (5) este necesar să fie îndeplinită cu aproximaţie relaţia

$$\frac{\left(\dfrac{t'_v}{\delta} + 1\right)(1 + t_v p) + \dfrac{m}{\delta} p}{1 + t_e p} \approx 1 + t' p. \tag{11}$$

Calculul valorilor funcției $F(p)$ pentru p real și imaginar la valori uzuale ale parametrilor, arată că aproximația liniară este valabilă cu o precizie suficientă (diferențele sînt în general sub 5%) pentru întregul domeniu real de variație a variabilei p care prezintă interes (vezi anexa 1).

b. *Se ține seama de insensibilitatea regulatorului de viteză.* Formal, regulatorul de viteză poate fi descompus într-un element neliniar fără inerție, căruia îi succede în schema structurală un element liniar cu funcția de transfer $\frac{1}{t_v p + 1}$.

Elementul fără inerție (fig. 2) este caracterizat de o bandă de reglaj cuprinsă între dreptele D, D'.

Dacă domeniul de variație al vitezei este v_1, v_2 punctul de funcționare avînd drept coordonate mărimile de intrare și de ieșire, va descrie suprafața haşurată în figură. Valoarea efectivă pe care o ia ordinul de reglaj o (mărimea de ieșire a elementului neliniar) la o anumită valoare a vitezei depinde de pozițiile anterioare ale punctului de funcționare. Pentru diferite procese individuale, acest domeniu va fi străbătut de diverse curbe

$$o = f_1(v), \ldots, f_n(v).$$

Comportarea medie a acestui element va fi descrisă în primă aproximație de o curbă care va face să corespundă fiecărei valori a vitezei, valoarea medie a ordinului de reglaj în diferite procese individuale. Dacă toate valorile din domeniul respectiv apar cu aceeași probabilitate, această curbă medie, este chiar diagonala D_m a patrulaterului haşurat. Se observă că statismul corespunzător este mai mare decît cel corespunzător dreptelor limită D, D'.

Utilizarea unui statism mediu se justifică și prin aceea că într-un sistem energetic poziția relativă a punctelor de funcționare ale regulatoa-

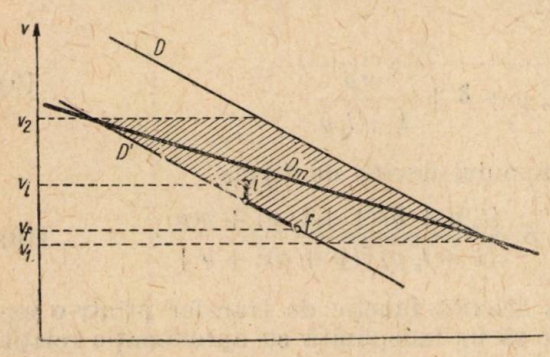


Fig. 2. — Caracteristica elementului neliniar al regulatorului cu insensibilitate.

relor generatoarelor individuale diferă, astfel încît în fiecare moment se realizează pentru generatorul echivalent o comportare medie.

Considerente de simetrie sugerează că și curba medie determinată printr-un calcul mai exact trebuie să fie tot o dreaptă.

c. *Se consideră două generatoare interconectate.* Fie

$\Pi(p)$ — imaginea perturbației rezultante;

$\Pi_1(p)$ și $\Pi_2(p)$ contribuția fiecărui generator, $F_1(p)$ și $F_2(p)$ funcțiile de transfer corespunzătoare. Din:

$$v(p) = F_1(p)\Pi_1(p) = F_2(p)\,\Pi_2(p), \tag{12}$$

$$\pi_1(p) + \pi_2(p) = \pi(p),$$

rezultă funcția de transfer a ansamblului

$$F(p) = \frac{v(p)}{\Pi(p)} = \frac{1}{\dfrac{1}{F_1(p)} + \dfrac{1}{F_2(p)}}. \tag{13}$$

În ipoteza unor regulatoare de viteză cu funcția de transfer dată de expresia (4) rezultă

$$F(p) = -\frac{\dfrac{1}{P_n}}{(T_1 + T_2)\,p + \dfrac{1}{s_{v1}(1 + t_{v1}\,p)} + \dfrac{1}{s_{v2}(1 + t_{v2}\,p)}}. \tag{14}$$

Se observă că dacă constantele de timp t_{v1} și t_{v2} ale regulatoarelor celor două generatoare sînt identice, rezultă un generator echivalent avînd o funcție de transfer de forma (5).

În caz contrar, funcția de transfer a generatorului echivalent poate fi pusă sub forma

$$F(p) = -K\frac{(t_{v1}\,p + 1)(t_{v2}\,p + 1)}{(t_e\,p + 1)\,[(p + a)^2 + b^2)]}, \tag{15}$$

unde:

$-\dfrac{1}{t_e}$, $-a \pm j\,b$ sînt polii funcției de transfer (14).

Pentru a demonstra posibilitatea înlocuirii funcției de transfer (15) printr-o expresie de forma (5) este suficient să fie îndeplinită cu aproximație relația

$$\frac{(t_{v1}\,p + 1)(t_{v2}\,p + 1)}{t_e\,p + 1} \approx t'p + 1. \tag{16}$$

În anexa 2, a fost studiată variația primului termen din relația (16) în domeniul imaginar și real al variabilei p, delimitat anterior pentru problema indicilor de calitate a reglajului. Se observă că înlocuirea este valabilă pentru întregul domeniu cu excepția unui interval în jurul valorii $p = -\dfrac{1}{t_e}$.

Pentru a preciza care este importanța practică a acestei diferențe dintre funcția de transfer reală și cea simplificată, s-a calculat funcția de autocorelație a frecvenței, în cazul unei fluctuații a puterii sarcinii perturbatoare avînd funcția de autocorelație

$$\mu_x(\tau) = \sigma_x^2 \, e^{-\frac{\tau}{t_e}}.$$

Comparația efectuată a arătat că diferența dintre rezultatele calculului exact și ale celui aproximativ este neglijabilă și că rezultatele obținute prin calculul cu funcția de transfer simplificată sînt acoperitoare (v. anexa 2).

3. CARACTERISTICI DINAMICE RAPORTATE LA UN NOD

În studiul reglajului tensiunii, precum și în studiul reglajului frecvenței, dacă se ține seama de efectul variațiilor tensiunii și de diferențele de fază din rețea, nu se poate stabili o funcție de transfer unică pentru întreg sistemul. Funcția de transfer depinde de nodul în care apar variațiile sarcinii și de nodul în care se măsoară variațiile tensiunii, ca amplitudine și ca fază.

S-a analizat de aceea o schemă formată dintr-un turboalternator echivalent care alimentează printr-o reactanță X_e o sarcină echivalentă de tip impedanță care absoarbe în regimul de bază puterea $P_0 + j\ Q_0$. În același nod N, se conectează în momentul $t = 0$ o sarcină perturbatoare $\Delta P + j\ \Delta Q$.

Regimul tranzitoriu consecutiv este descris de relațiile

$$e_e(t) = e_d + T_{d0} \frac{\mathrm{d}e'_d}{\mathrm{d}t}, \tag{17}$$

— ecuația tensiunilor din circuitul rotoric, raportate la stator;

$$I_d = \frac{e_d - e'_d}{X_d - X'_d} = \frac{e'_d - u_d}{X'_d + X_e}, \tag{18}$$

— ecuația componentei longitudinale a curentului din circuitul statoric;

$$(E_{d0} + e_d)(\cos \delta_r + j \sin \delta_r) = (1+u)\,[1 + j(X_d + X_e)(P_0 + \Delta P - jQ_0 - j\,\Delta Q)], \tag{19}$$

— ecuația căderii de tensiune în reactanța sincronă X_d a generatorului echivalent și reactanța exterioară X_e;

$$(U_{g0} + u_g)(\cos \delta'_r + j \sin \delta'_r) = (1+u)\,[1 + j(X'_d + X_e)(P_0 + \Delta P - j\,Q_0 - j\,\Delta Q) \tag{20}$$

— ecuația căderii de tensiune în reactanța tranzitorie longitudinală X'_d și reactanța exterioară X_e.

Notațiile folosite rezultă din diagrama din figura 3.

După cum s-a precizat în introducere, variațiile puterilor debitate de generatoare la fluctuații rapide ale sarcinii sînt sub 10% din puterea nominală a acestora, ceea ce permite liniarizarea ecuațiilor ce descriu funcționarea generatoarelor în regim dinamic.

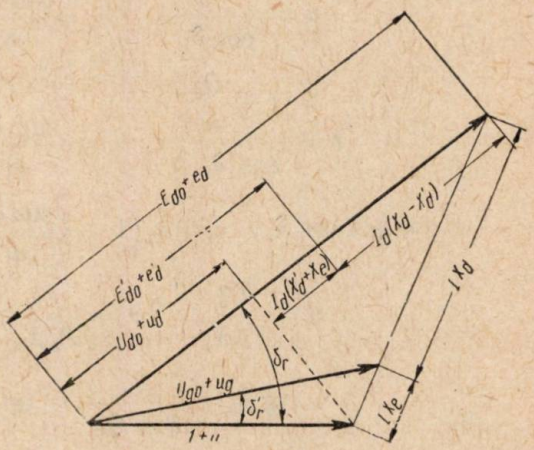


Fig. 3. — Diagrama tensiunilor în studiul caracteristicii dinamice raportate la un nod.

Liniarizînd ecuațiile indicate mai sus, aplicînd transformata Laplace și eliminînd variabilele intermediare, se obțin următoarele expresii pentru imaginile mărimilor caracteristice ale generatorului echivalent, în funcție de mărimile u, ΔP și ΔQ ce caracterizează regimul pentru nodul considerat

$$e_d(p) = a\,u(p) + a_1\,\Delta P(p) + a_2\,\Delta Q(p), \tag{21}$$

$$u_q(p) = b\,u(p) + b_1\,\Delta P(p) + b_2\,\Delta Q(p), \tag{22}$$

$$\frac{\partial \Delta\delta_r}{\partial u} = 0\,; \quad \frac{\partial \Delta\delta_r}{\partial \Delta P} = \frac{X_t \cos^2 \delta_r}{2\pi f(U_0^2 + Q_c X_t)}\,; \quad \frac{\partial \Delta\delta_r}{\partial \Delta Q} = \frac{X_t \sin \delta_r \cos \delta_r}{2\pi f(U_0^2 + Q_0 X_t)}\,; \tag{23}$$

$$X_t = X_d + X_e,$$

$$u_d(p) = u(p)\cos \delta_r - \Delta\delta_r(p) \sin \delta_r. \tag{24}$$

Ținînd seama că funcția de transfer a sistemului de excitație al generatorului echivalent este

$$f_u(p) = \frac{e_e(p)}{u_g(p)},$$

se obține următoarea ecuație caracteristică pentru regimul dinamic în nodul N, produs de o sarcină perturbatoare în acest nod

$$u(p) = \frac{b_1 f_u(p) - a_1 - c_1\,T'_d\,p}{a - b\,f_u(p) + c\,T'_d\,p}\,\Delta P(p) + \frac{b_2 f_u(p) - a_2 - c_2\,T'_d\,p}{a - b\,f_u(p) + c\,T'_d\,p}\,\Delta Q(p), \tag{25}$$

$$v(p) = v_G(p) + p\,[d_1\,\Delta P(p) + d_2\,\Delta Q(p)]. \tag{26}$$

S-a notat cu v_G valoarea relativă a abaterii vitezei de rotație a arborelui generatorului echivalent și cu P_b puterea de bază.

Constantele a, b, c etc. au expresiile

$$a = \frac{1 + \frac{Q_0}{S}}{\cos \delta_r}, \quad a_1 = \frac{\sin \delta_r}{S}, \quad a_2 = \frac{\cos \delta_r}{S},$$

$$b = \frac{1 + \frac{Q_0}{S'}}{\cos \delta'_r}; \quad b_1 = \frac{\sin \delta'_r}{S}; \quad b_2 = \frac{\cos \delta'_r}{S'}$$

$$c = a + \xi \cos \delta_r; \quad c_1 = a_1\left(1 - \xi \frac{\cos \delta_r}{a}\right); \quad c_2 = a_2\left(1 + \xi \frac{a_1}{a} \sin \delta_r\right),$$

$$S = \frac{U_0^2}{P_b X_t}; \quad S' = \frac{U_0^2}{P_b X_e}; \quad \xi = \frac{X_d - X'_d}{X'_d + X_e},$$

$$\operatorname{tg} \delta_r = \frac{P_0}{S + Q_0}; \quad \operatorname{tg} \delta'_r = \frac{P_0}{S' + Q_0}.$$

Relațiile deduse au fost folosite în studiul reglajului de tensiune și în studiul interdependenței dintre reglajul frecvenței și al tensiunii.

4. STUDIUL REGLAJULUI TENSIUNII ȘI AL PUTERILOR REACTIVE

În capitolul precedent s-a dedus o expresie a imaginii abaterilor tensiunii față de regimul staționar, de forma

$$u(p) = U_P(p)\ \Delta P(p) + U_Q(p)\ \Delta Q(p). \tag{25a}$$

În figura 4 sînt reprezentate valorile obținute pentru $U_P(p)$ și $U_Q(p)$ în domeniul de variație al variabilei complexe $|p| < 1$, în cazul unor parametri tipici pentru schema echivalentă

$$X_d = 1{,}8, \quad X'_d = 0{,}2, \quad X_e = 0{,}1, \quad T_{d0} = 13 \text{ s},$$

$$P_0 = 0{,}8, \quad Q_0 = 0{,}3$$

(s-a luat ca puterea de bază, puterea nominală a grupului echivalent).

Se observă că valorile obținute pentru $U_P(p)$ și $U_Q(p)$ sînt comparabile între ele.

Astfel, în studiul regimurilor tranzitorii ale tensiunii (ca și în studiul regimurilor staționare [11], [12]) sistemul electroenergetic este reprezentat printr-o schemă cu două mărimi de intrare ΔP și ΔQ și cu o mărime de ieșire u. Funcțiile de transfer corespunzătoare sînt $U_P(p)$ și $U_Q(p)$.

Este ușor de verificat că în cazul în care un nod este conectat printr-o linie cu capacitate de transport corespunzătoare sarcinii din nod, la

un sistem electroenergetic mult mai puternic ($X_e \gg X_d$), funcţiile de transfer $U_P(p)$ şi $U_Q(p)$ se reduc la cîte o constantă; pentru un asemenea sistem, se poate folosi şi în regim dinamic caracteristica statică

$$u = \alpha_1 \, \Delta P + \alpha_2 \, \Delta Q.$$

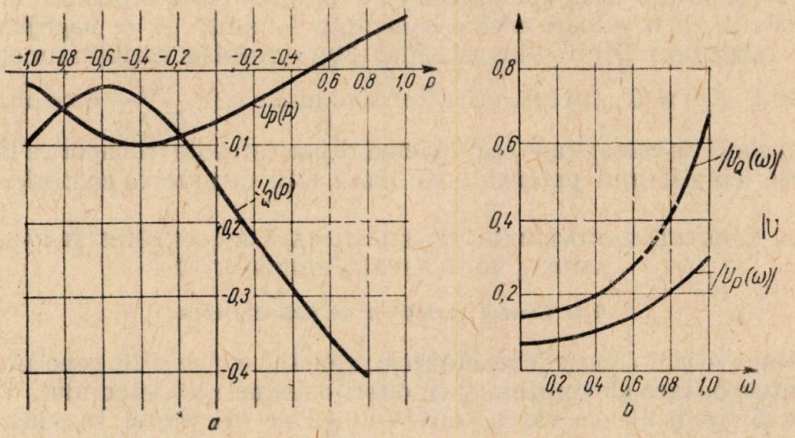


Fig. 4. — Funcţiile de transfer $U_P(p)$ şi $U_Q(p)$ în cazul unui generator unic echivalent. *a* — în domeniul variabilei reale; *b* — în domeniul variabilei imaginare.

Un caz mai general este acela în care un nod este interconectat atît cu un sistem puternic (*a*) cît şi cu o centrală de putere comparabilă cu aceea cerută de sarcina locală (conform schemei din fig. 5).

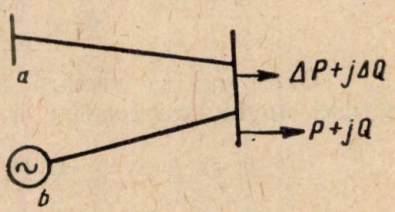


Fig. 5. — Schema unui nod conectat la un sistem puternic şi un generator echivalent.

Pentru o evaluare cantitativă a variaţiilor tensiunii într-un astfel de nod, s-a presupus că întreaga variaţie de putere activă din nod este preluată de sistemul *a*. Ecuaţiile de bilanţ a puterilor şi ecuaţia tensiunii în nod, sînt

$$u(p) = \alpha_1 \, \Delta P(p) + \alpha_2 \, \Delta Q_a(p) = U_Q(p) \, \Delta Q_b(p), \tag{27}$$

$$\Delta Q_a + \Delta Q_b = \Delta Q. \tag{28}$$

Rezultă

$$u(p) = U_{1P}(p) \, \Delta P(p) + U_{1Q}(p) \, \Delta Q(p), \tag{29}$$

$$U_{1P}(p) = \frac{\alpha_1}{1 + \dfrac{\alpha_2}{U_Q(p)}}; \quad U_{1Q}(p) = \frac{\alpha_2}{1 + \dfrac{\alpha_2}{U_Q(p)}}. \tag{30}$$

În diagrama 6 sînt reprezentate funcțiile de transfer $U_{1P}(p)$ și $U_{1Q}(p)$, în cazul unui nod legat atît de centrala analizată în exemplul precedent, cît și de un sistem puternic, avînd: $\alpha_1 = -0{,}1$; $\alpha_2 = -0{,}2$. Se observă că în acest caz variația funcțiilor de transfer este mai puțin accentuată, fiind posibil ca în aplicații în care nu interesează o precizie mare, să fie înlocuite cu o valoare medie constantă — adică să se neglijeze fenomenul tranzitoriu. Din analiza relațiilor (30), rezultă că variația funcțiilor de transfer $U_{1P}(p)$ și $U_{1Q}(p)$ este cu atît mai redusă cu cît $\frac{\alpha_2}{U_Q(p)}$ este mai mic; această condiție corespunde cazului cînd capacitatea de transport a legăturii electrice cu sistemul puternic este mare față de puterea centralei locale.

4. EFECTUL VARIAȚIILOR TENSIUNII CA AMPLITUDINE ȘI FAZĂ ASUPRA REGLAJULUI FRECVENȚEI

4.1. Efectul variațiilor de fază din rețea

Dacă se ține seama de reactanțele rețelei electrice și ale generatoarelor, diferențele de fază ale tensiunilor în diferite noduri ale sistemului, vor conduce la diferențe ale derivatelor fazei — adică ale frecvenței. În schema echivalentă simplă, cu un singur generator echivalent studiată în capitolul 2, între viteza unghiulară relativă la arbore și cea din nodul N, există diferența

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\,\delta_r = d_1 \frac{\mathrm{d}\,\Delta P}{\mathrm{d}t} + d_2 \frac{\mathrm{d}\,\Delta Q}{\mathrm{d}t}, \tag{31}$$

unde

$$d_1 = \frac{\partial\,\Delta\delta_r}{\partial\,\Delta P}, \qquad d_2 = \frac{\partial\,\Delta\delta_r}{\partial\,\Delta Q}.$$

Dacă sarcina variază după o funcție $\Delta P(t) + j\,\Delta Q(t)$, variația vitezei unghiulare relative a tensiunii din nodul N: $v(t)$ se determină

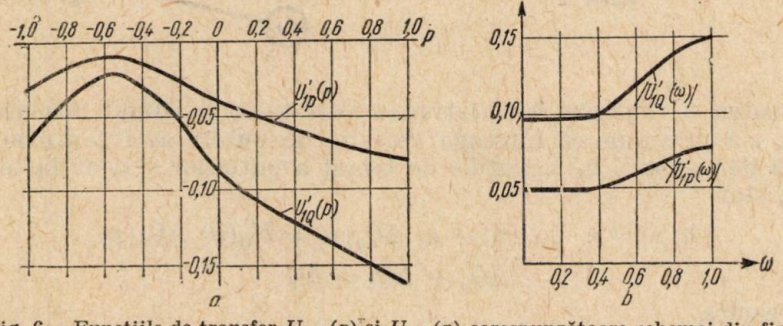


Fig. 6. — Funcțiile de transfer $U_{1P}(p)$ și $U_{1Q}(p)$ corespunzătoare schemei din fig. 5. *a* — în domeniul variabilei reale; *b* — în domeniul variabilei imaginare.

din ecuația diferențială a mișcării rotorului generatorului echivalent, ținînd seama și de relația (31). Aplicînd apoi transformata Laplace, rezultă:

$$v(p) = F(p)\,\Delta P(p) + p\,d_1\,\Delta P(p) + p\,d_2\,\Delta Q(p),$$

unde $F(p)$ este funcția de transfer determinată în ipoteza unei frecvențe unice în întregul sistem.

În regim normal de funcționare al unui sistem electroenergetic, variațiile puterii reactive sînt în general corelate cu variațiile puterii active. Funcția de autocorelație a variațiilor puterii reactive poate fi scrisă de aceea sub forma

$$\mu_Q(\tau) = \gamma\, \mu_P(\tau) + \mu_{1Q}(\tau), \tag{32}$$

unde

$$\mu_{1Q}(0) < \mu_Q(0).$$

Imaginea funcției de autocorelație a variației vitezei va fi deci

$$\mu_v(p_1 p_2) = F_1(p_1)\, F_1(p_2)\, \mu_P(p_1 p_2) + d_2^2\, p_1 p_2\, \mu_{1Q}(p_1 p_2), \tag{33}$$

cu

$$F_1(p) = F(p) + p d_1. \tag{34}$$

Pentru un sistem cu parametrii uzuali

$$X_d + X_e = 1{,}9, \qquad P_0 = 0{,}8, \qquad Q_0 = 0{,}3,$$

rezultă

$$d_1 \approx d_2 \approx 0{,}002.$$

Comparînd valorile acestor coeficienți cu valorile funcției de transfer $\overline{F(p)}$ (vezi fig. 7), se observă că diferența dintre funcția de transfer exactă $F_1(p)$ și cea dedusă fără a ține seama de variațiile fazei în generatoare și rețea, nu depășește niciodată 5% în domeniul $|p| \leqslant 1$. În domeniul variațiilor statistice ale sarcinii, este deci justificată ipoteza unei frecvențe unice, independente de nodul în care aceasta se măsoară.

Cu atît mai mult poate fi neglijat termenul $d_2^2 p_1 p_2 \mu_Q(p_1 p_2)$ deoarece funcția de autocorelație a puterii reactive nu conține termeni cu variații mai rapide decît funcția de autocorelație a puterii active, astfel încît domeniul parcurs de variabila complexă p este același, d_2 are același ordin de mărime cu d_1, iar

$$\mu_{1Q}(0) \ll \mu_P(0).$$

4.2. Efectul variațiilor de tensiune

Dacă se ține seama de autoreglajul sarcinii în raport cu tensiunea, funcția imagine a variațiilor frecvenței în nodul în care apare o sarcină perturbatoare $\Delta P(t) + j\, \Delta Q(t)$, devine

$$v(p) = F(p)\, [1 + K_u\, U_P(p)\, \Delta P(p) + K_u\, U_Q(p)\, \Delta Q(p)]. \tag{35}$$

Dacă se ține seama de corelația dintre puterea activă și cea reactivă (relația (32)), imaginea funcției de autocorelație a variațiilor frecvenței devine :

$$\mu_v(p_1p_2) = F_2(p_1)\,F_2(p_2)\,\mu_P(p_1p_2) + F_3(p_1)\,F_3(p_2)\,\mu_{1Q}(p_1p_2), \qquad (36)$$

unde

$$F_2(p) = \{1 - K_u\,U_P(p)\,[1+\gamma]\}\,F(p), \qquad (37)$$

$$F_3(p) = K_u\,U_Q(p)\,F(p), \qquad (38)$$

K_u — este constanta de autoreglaj a sarcinii în raport cu tensiunea ;

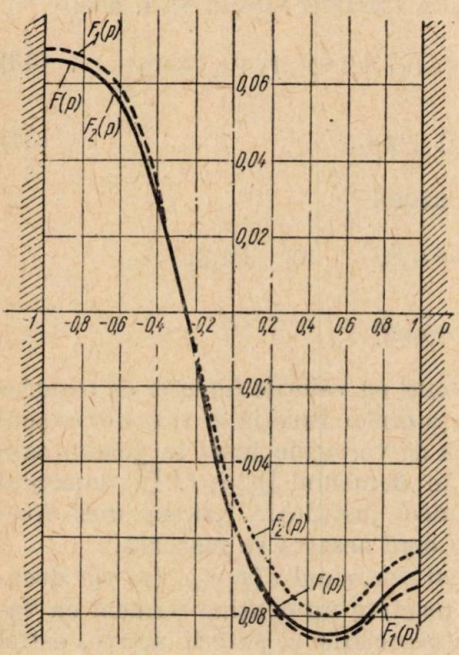


Fig. 7. — Efectul variațiilor tensiunilor ca fază și amplitudine, asupra reglajului frecvenței : $F(p)$ — se neglijează efectul variațiilor locale ; $F_1(p)$ — se ține seama de variațiile de fază locale, dar se neglijează variațiile amplitudinii tensiunii ; $F_2(p)$ — se ține seama de variațiile fazei și ale amplitudinii tensiunii.

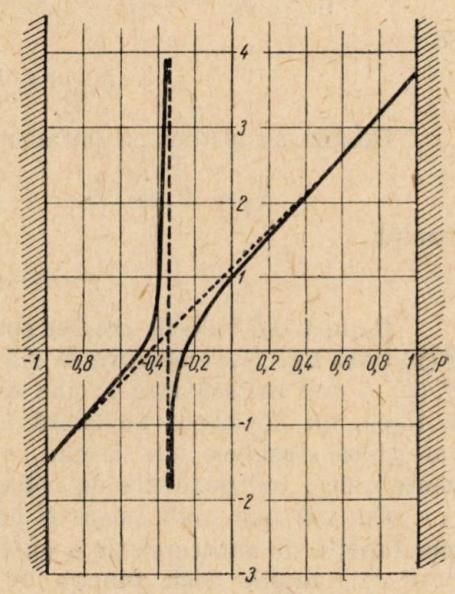


Fig. 8. — Studiul posibilităților de simplificare a funcției de transfer a două generatoare interconectate ; $\Phi(p)$ — termen al funcției de exacte de transfer ; $\Phi_\sim(p)$ — termen al funcției de transfer aproximative.

$F(p)$ — este funcția de transfer obținută neglijînd efectul variațiilor de tensiune.

Cu valorile calculate pentru $U_{1P}(p)$ în paragraful 3 (nod dintr-un sistem puternic la care este conectată și o centrală locală) și luînd K_u=1,2

și $\gamma = 0{,}25$ s-au obținut valorile din tabela 1, pentru coeficientul de corecție η

$$\eta = 1 - K_u\, U_P(p)\,[1 + \gamma]. \tag{39}$$

Tabela 1

p	η
− 1	0,95
− 0,8	0,973
− 0,6	0,985
− 0,4	0,975
− 0,2	0,96
0	0,935
0,2	0,925
0,4	0,910
0,6	0,903
0,8	0,890
1	0,880

Se observă că luînd un coefcient de corecție mediu constant, eroarea ce rezultă este de cel mult 5% în intervalul $|p| < 1$, corespunzător fluctuațiilor statistice ale sarcinii, astfel încît nu rezultă necesară schimbarea structurii funcției de transfer pentru a ține seama de fenomenele tranzitorii datorite reglajului tensiunii. Aplicînd același raționament ca și în paragraful precedent, rezultă că termenul $F_3(p_1)\,F_3(p_2)\,\mu_{1\zeta}\,(p_1 p_2)$ este neglijabil.

În diagrama din figura 7, coeficientul de corecție η a fost aplicat funcției $F_1(p)$, obținîndu-se astfel funcția de transfer $F_2(p)$ în ipoteza că se ține seama de variațiile tensiunii în rețea ca amplitudine și ca fază. Se observă că în cea mai mare parte a domeniului studiat, efectele variațiilor de fază și de tensiune se compensează reciproc, astfel încît simplificările propuse ținînd seama de fiecare din efecte în parte, sînt valabile și în cazul considerării simultane a ambelor efecte.

În rețele reale, sarcinile perturbatoare apar în noduri cu variații de tensiune și fază diferite, astfel încît pentru întregul sistem se poate aplica un coeficient de corecție mediu, sau, dacă în sistem variațiile tensiunii nu sînt prea mari, se poate neglija acest efect în studiul reglajului frecvenței.

Dacă determinarea funcției de transfer se face pe cale experimentală, utilizînd o metodă statistică [4], [5] coeficientul de corecție va fi inclus în rezultatul obținut, cu condiția să se determine funcția de transfer pentru perturbații produse în diverse noduri și apoi să se utilizeze o medie statistică a acestor rezultate sau să se determine funcția de transfer pentru o perturbație produsă într-un nod central al sistemului, caracterizat prin variații medii ale tensiunii.

★

Trebuie subliniat că simplificările recomandate în legătură cu efectele variațiilor tensiunii și fazei asupra reglajului frecvenței, sînt valabile

numai în domeniul corespunzător variațiilor statistice ale sarcinii. Ele nu pot fi extrapolate de exemplu în cazul deconectărilor bruște ale sarcinii folosite la determinarea parametrilor sistemului, prin metoda impulsională. De aceea, pentru studiul comportării sistemului la variații statistice ale sarcinii este preferabil să se folosească o funcție de transfer determinată menținînd variațiile de tensiune cît mai mici în nodul în care apare perturbația, prin optimizarea condițiilor experimentale [9], [10].

Toate simplificările studiate — atît cele referitoare la efectele variațiilor tensiunii și ale fazei, cît și cele referitoare la efectele inteconectării generatoarelor și la simplificarea funcțiilor de transfer ale regulatoarelor, sînt valabile de asemenea numai în domeniul $|p| \leqslant 1$. Din această cauză, dacă se urmărește determinarea experimentală a parametrilor caracteristici ai sistemului (constantele din expresia (5)), prin metoda impulsională, nu este admisibil să se utilizeze porțiunea inițială a răspunsului tranzitoriu — care corespunde valorilor mari ale variabilei p. De exemplu, nu este admisibil să se determine timpul de lansare prin trasarea tangentei în origine; nici corectarea tangentei în origine prin extrapolarea răspunsului tranzitoriu printr-o curbă exponențială nu poate fi considerată satisfăcătoare, deoarece aceasta ar corespunde înlocuirii funcției de transfer a sistemului, printr-o funcție cu un singur pol real, ceea ce nu este corect, după cum s-a arătat în capitolul 2. O soluție satisfăcătoare se poate obține numai găsind o aproximație a răspunsului tranzitoriu care să corespundă unei funcții de transfer de forma căutată.

Ca și în parametrii timp de lansare, energia reglantă, folosiți curent pentru caracterizarea comportării dinamice a sistemelor energetice, parametrii funcției de transfer depind de structura și regimul de încărcare al sistemului energetic considerat; pentru calcule precise este deci necesar să se determine acești parametri separat pentru fiecare din zonele caracteristice ale curbei de sarcină.

CONCLUZII

1. În studiul indicilor de calitate a reglajului frecvenței și tensiunii se pot folosi pentru sistemul electroenergetic (exclusiv sistemul de reglare automată a frecvenței), funcții de transfer simplificate. Simplificările adoptate trebuie să fie valabile în domeniul variațiilor statistice ale sarcinilor și în domeniul polilor funcției de transfer considerate; acest domeniu corespunde domeniului $|p| < 1$, pentru variabila independentă a transformatei Laplace.

2. Cea mai simplă funcție de transfer care poate da rezultate satisfăcătoare în studiul reglajului frecvenței este de forma:

$$F(p) = -K\frac{t'p + 1}{(p + a)^2 + b^2}.$$

Funcțiile de transfer exacte obținute ținînd seama de termenul accelerometric al funcțiilor de transfer și de efectul insensibilității unor regu-

latoare de viteză, de efectul interconectării generatoarelor, de efectul variațiilor tensiunii ca amplitudine și fază, pot fi înlocuite printr-o funcție de transfer simplificată de forma arătată.

3. În studiul reglajului tensiunii, sistemul electroenergetic trebuie considerat ca avînd două mărimi de intrare — fluctuațiile puterii active și ale celei reactive.

4. La determinarea experimentală a caracteristicilor sistemului, se obțin direct parametrii funcției de transfer simplificate dacă se iau anumite precauții cu privire la modul de efectuare a experiențelor și de interpretare a rezultatelor.

ANEXA 1

CALCULUL ERORILOR DATORATE SIMPLIFICĂRII FUNCȚIEI DE TRANSFER A SISTEMULUI, ÎN CAZUL UNUI REGULATOR DE VITEZĂ CU STATISM TRANZITORIU

Dacă funcția de transfer a regulatorului de viteză este

$$f_v(p) = \frac{-1}{t'_v p + \delta + \dfrac{mp}{1 + t_v p}},$$

funcția de transfer a sistemului devine

$$F(p) = -\frac{1/P_n}{T_p + \alpha + \dfrac{t_v p}{(t'_v p + \delta)(t_v p + 1) + mp}}.$$

S-au admis pentru parametri, valorile uzuale

$$t'_v = 0{,}05 \text{ s}, \quad t_v = 10 \text{ s}, \quad T = 8 \text{ s},$$
$$\delta = 0{,}05; \quad \alpha = 1 \text{ s}; \quad m = 4 \text{ s}.$$

Anulînd numitorul funcției de transfer, se obține un pol real și doi poli complecși conjugați

$$p_1 = -1/t_e,$$
$$p_{2,3} = -a \pm jb.$$

Funcția de transfer a sistemului poate fi scrisă sub forma

$$F(p) = -K \frac{(t'_v p/\delta + 1)(t_v p + 1) + \dfrac{m}{\delta} p}{(t_e p + 1)\,[(p + a)^2 + b^2]}.$$

Pentru a putea aproxima această funcție de transfer, printr-o expresie de forma

$$F_{\sim}(p) = -K \frac{t' p + 1}{(p + a)^2 + b^2}$$

este necesar să fie îndeplinită cu aproximație, relația

$$\Phi(p) \approx \Phi_{\sim}(p),$$

unde

$$\Phi(p) = \frac{(t'_v\, p/\delta + 1)(t_v\, p + 1) + mp}{t_e\, p + 1}\ ;\ \Phi_{\sim}(p) = 1 + t'_p\,.$$

Cu parametrii aleşi, rezultă

$$\Phi(p) = \frac{10\, p^2 + 91\, p + 1}{p/11 + 1}\,.$$

Luînd $t' = 90$, rezultă pentru p real şi imaginar în domeniul $|p| \leqslant 1$, valorile din tabela 2, ale funcţiilor $\Phi(p)$ şi $\Phi_{\sim}(p)$.

S-a notat

$$\Phi(j\omega) = A\, e^{j\varphi}\,. \qquad \Phi_{\sim}(j\omega) = A_{\sim}\, e^{j\varphi_{\sim}}$$

Tabela 2

ω	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
A	1	9,06	18,1	36,5	54,3	72,7	91
$A_{\sim}$	1	9,06	18,1	36	54	72	90
ε_A %	0	0	0	1,25	0,55	0,91	1,1
φ	0	83°45′	87°15′	88°50′	89°25′	90°	89°40′
$\varphi_{\sim}$	0	83°40′	86°50′	88°25′	88°55′	89°15′	89°40′
$\Delta\varphi$	0	0	25′	25′	30′	45′	0

p	−1	−0,8	−0,6	−0,4	−0,2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\Phi(p)$	−88	−70,4	−52,8	−35	−15,45	1	19,22	36,6	56,2	74,7	93,2
$\Phi_{\sim}(p)$	−89	−71	−53	−35	−17,11	1	19	37	55	73	91
ε_{Φ} %	1,1	0,8	0,38	0	0,6	0	1,3	1,1	2,2	2,32	2,4

ANEXA 2

CALCULUL ERORILOR DATORATE SIMPLIFICĂRII FUNCŢIEI DE TRANSFER A DOUĂ GENERATOARE INTERCONECTATE

Dacă funcţiile de transfer ale regulatoarelor de viteză sînt simple, funcţia de transfer a ansamblului format din două generatoare, inclusiv regulatoarele de viteză şi sarcinile lor, este

$$F(p) = -\frac{1/P_n}{(T_1 + T_2)\, p + \alpha_1 + \alpha_2 + \dfrac{1}{s_1(1 + t_{v1}\, p)} + \dfrac{1}{s_2(1 + t_{v2}\, p)}}$$

(vezi relația (14)).

Dacă $p = -\dfrac{1}{t_e}$ este polul real al acestei funcții de transfer, rezultă că pentru ca ea să poată fi aproximată printr-o expresie de forma

$$F_{\sim}(p) = -K\frac{t'p+1}{(p+a)^2+b^2}$$

este suficient să se poată aproxima

$$\Phi(p) \approx \Phi_{\sim}(p)$$

unde

$$\Phi(p) = \frac{(1+t_{v1}p)(1+t_{v2}p)}{1+t_e p}\ ;\ \Phi_{\sim}(p) = 1+t'p$$

(vezi anexa 1).

Valoarea $-1/t_e$ a polului real depinde de toți parametrii ce intervin în numitorul funcției de transfer. Expresia $\Phi(p)$ poate fi pusă sub forma

$$\Phi(p) = 1+(t_{v1}+t_{v2}-t_e)p + \frac{t_{v1}t_{v2}-t_e(t_{v1}+t_{v2}-t_e)}{1+t_e p}p^2.$$

Liniarizarea expresiei $\Phi(p)$ va conduce la erori cu atît mai mari cu cît coeficientul ultimului termen din expresia de mai sus este mai mare. Acest coeficient devine maxim, dacă

$$t_e = \frac{t_{v1}+t_{v2}}{2}.$$

S-au studiat de aceea erorile rezultate prin simplificare, cu următoarele valori:

$$t_{v1} = 2\text{ s},\quad t_{v2} = 4\text{ s},\qquad t_e = 3\text{ s}.$$

În tabela 3 sînt redate valorile funcțiilor $\Phi(p)$ și $\Phi_{\sim}(p)$ precum și erorile de amplitudine și fază, pentru p imaginar, cuprins în domeniul $|p| \leqslant 1$

$$\Phi(p) = A\,e^{j\varphi} \qquad \Phi_{\sim}(p) = A_{\sim}\,e^{j\varphi_{\sim}}$$

Tabela 3

ω	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
A	1	1,055	1,18	1,54	1,97	2,44	2,92
$A_{\sim}$	1	1,035	1,13	1,45	1,90	2,38	2,38
ε_A %		2	4	5,8	3,5	2,5	1
φ	0	16°25′	29°30′	46°29′	56°40′	63°13′	67°50′
$\varphi_{\sim}$	0	15°7′	28°22′	45°13′	58°19′	65°10′	69°40′
$\Delta\varphi$	0	1°18′	1°08′	1°16′	−1°39′	−1°57′	−1°50′

Pentru p real, s-a trasat diagrama din figura 8.

Se observă că simplificarea este valabilă pentru întregul domeniu, cu excepția valorilor

$$-1/t_e - 0{,}05 \leqslant p \leqslant -1/t_e + 0{,}05.$$

Pentru a preciza care este importanța diferenței constatate între funcția de transfer reală și cea simplificată, în domeniul $p \approx -1/t_e$ s-a calculat funcția de autocorelație a frecvenței în cazul unei fluctuații a puterii sarcinii perturbatoare având funcția de autocorelație:

$$\mu_x(\tau) = \sigma_x^2 \, e^{-\tau/t_e}.$$

Ținînd seama de relațiile (2) și (40) (vezi anexa 3) funcția de autocorelație a mărimii de ieșire rezultă în acest caz de forma

$$\mu_y(\tau) = Y_1 e^{-a\tau} \cos b\tau + Y_2(\tau) e^{-\tau/t_e}.$$

Coeficientul Y_1 poate fi determinat cu ajutorul relației (2) folosind pentru funcția de transfer expresia simplificată, care conduce la o precizie satisfăcătoare a calculului în domeniul $p = -a \pm jb$

$$Y_1 = \mathcal{R}eal \frac{-4\sigma_x^2/t_e}{(-a+jb)^2 - (1/t_e)^2} F_\sim\left(\frac{1}{t_e}\right) v_\sim,$$

unde

$$F_\sim(p) = -K \frac{1 + t'p}{(p+a)^2 + b^2},$$

iar

$$v_\sim \, e^{(-a+jb)\tau} + v_\sim^* \, e^{(-a-jb)\tau}$$

este originalul funcției de transfer simplificată $F(p)$

$$v_\sim = -\frac{K}{2}\left(t' + j\frac{a}{b}t' - j/b\right),$$

$$F_\sim(1/t_e) = -K \frac{1 + t_v'/t_e}{(a + 1/t_e)^2 + b^2}.$$

Pentru

$$T = 10 \text{ s}, \quad \alpha = 1, \quad t_v = 4\text{s}, \quad t_e = 3\text{s},$$

$$s_v = 0{,}05, \quad t_v' = 2{,}7 \text{ s},$$

rezultă

$$K = 1/40, \qquad a = 0{,}17, \qquad b = 0{,}67,$$

$$Y_1 = 13{,}3 \; \sigma_x^2 K^2.$$

Funcția de transfer exactă poate fi scrisă sub forma:

$$F(p) = -K \frac{(1 + t_{v1}p)(1 + t_{v2}p)}{(1 + t_e p)[(p+a)^2 + b^2]} = \frac{V(p)}{1 + t_e p}.$$

Aplicînd relația (40) din anexa 3, se obține

$$Y_2(\tau) = K^2 \sigma_x^2 [0{,}184 - 0{,}21\tau] \, e^{-\tau/3}.$$

Astfel, folosind funcția de transfer exactă, funcția de autocorelație a mărimii de ieșire este

$$\mu_y(\tau) = K^2 \sigma_x^2 \, [13{,}3 \, e^{-0{,}17\tau} \cos 0{,}67\tau + (0{,}184 - 0{,}21\tau) e^{-\tau/3}],$$

iar folosind funcția de transfer aproximativă :

$$\mu_y(\tau) = K^2\sigma_x^2\ [13{,}3\ e^{-0{,}17\,\tau}\cos 0{,}67\,\tau + 0{,}57\ e^{-\tau/3}].$$

Se observă că termenul exponențial este practic neglijabil atit în rezultatul exact, cît și în cel aproximativ și că prin calculul aproximativ se obțin rezultate acoperitoare.

ANEXA 3

CALCULUL FUNCȚIEI DE AUTOCORELAȚIE ÎN CAZUL EXISTENȚEI UNOR POLI DUBLI, REALI

Fie $F(p)$ funcția de transfer a unui sistem liniar, care admite un pol real, $p = -1/t_e$. Dacă mărimea de intrare a acestui sistem liniar variază statistic și are o funcție de autocorelație

$$\mu_x(\tau) = \sigma_x^2\, e^{-\tau/t_e}$$

imaginea funcției de autocorelație a mărimii de ieșire, va fi

$$\mu_y(\tau) = \sigma_x^2\, F(p_1)\, F(p_2)\, \frac{t_e}{p_1+p_2}\left[\frac{1}{1+t_e p_1} + \frac{1}{1+t_e p_2}\right],$$

sau, notînd :

$$F(p) = \frac{V(p)}{1+t_e p}$$

unde $V(p)$ este o funcție ce admite numai poli simpli

$$\mu_y(p_1 p_2) = \sigma_x^2\, \frac{V(p_1)\, V(p_2)}{(1+t_e p_1)(1+t_e p_2)}\, \frac{t_e}{p_1+p_2}\left[\frac{1}{1+t_e p_1} + \frac{1}{1+t_e p_2}\right].$$

Deoarece în funcția de autocorelație intervin numai termenii staționari (care rămîn finiți cînd t_1 și t_2 tind către ∞), nu se vor calcula decît termenii funcției originale, care depind de diferența dintre t_1 și t_2. Funcția de autocorelație va rezulta astfel din

$$\mu_y(t_1 t_2) = \sum_i \operatorname*{Rez}_{\substack{p_2=-p_1 \\ p_1=\nu_i}} [e^{p_1 t_1 + p_2 t_2}\ \mu_y(p_1 p_2)] + \sum_i \operatorname*{Rez}_{\substack{p_1=-p_2 \\ p_2=\nu_i}} [e^{p_1 t_1 + p_2 t_2}\ \mu_y(p_1 p_2)],$$

unde ν_i sînt polii funcției $(p_1 + p_2)\, F(p)$,

iar $\operatorname*{Rez}_{\substack{p_1=z_1 \\ p_2=z_2}} [\varphi(p_1 p_2)]$ reprezintă reziduul funcției $\varphi(p_1 p_2)$ în punctul $p_1 = z_1$; $p_2 = z_2$.

Calculînd reziduul primului termen pentru $p_2 = -p_1$, iar al celui de-al doilea pentru $p_1 = -p_2$, rezultă

$$\mu_y(t_1 t_2) = e^{-p_1 t_2} \sum_i \operatorname*{Rez}_{p_1=\nu_i} [e^{p_1 t_1}(p_1+p_2)\, \mu_y(p_1, p_2 = -p_1)] +$$

$$+ e^{-p_2 t_1} \sum_i \operatorname*{Rez}_{p_2=\nu_i} [e^{p_2 t_2}(p_1+p_2)\, \mu_y(p_1 = -p_2, p_2)].$$

Ţinînd seama de teorema întîrzierii rezultă :

$$\mu_y(t_1 t_2) = \sum_{t_1 \geqslant t_2} \operatorname{Rez}_{p_1 = \nu_i} [e^{p_1(t_1 - t_2)} (p_1 + p_2) \mu_y(p_1, p_2 = -p_1)] +$$

$$+ \sum_{t_1 \geqslant t_2} \operatorname{Rez}_{p_2 = \nu_i} [e^{p_2(t_2 - t_1)} (p_1 + p_2) \mu_y(p_2, p_1 = -p_2)] =$$

$$= \sigma_x^2 t_e \sum_{p = \nu_i} \operatorname{Rez} \left\{ \frac{V(p)\, V(-p)}{(1 + t_e p)(1 - t_e p)} \left[\frac{1}{1 + t_e p} + \frac{1}{1 - t_e p} \right] e^{p\tau} \right\} =$$

$$= \frac{2\sigma_x^2}{t_e} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}p} \left[\frac{V(p)\, V(-p)}{(1 - t_e p)^2} e^{p\tau} \right] + \sum_{i=2}^{n} Y_i e^{\nu_i \tau} ,$$

unde : $\nu_2, \ldots, \nu_n$ sînt polii funcţiei $V(p)$, iar

$$Y_i = 2\sigma_x^2 t_e \lim_{p \to \nu_i} \left\{ \frac{(p - \nu_i)\, V(p)\, V(-p)}{(1 - t_e^2 p^2)^2} \right\}.$$

Efectuînd derivata din primul termen, se obţine expresia funcţiei de autocorelaţie a mărimii de ieşire :

$$\mu_y(\tau) = \frac{\sigma_x^2}{2} V\left(\frac{1}{t_e}\right) V\left(-\frac{1}{t_e}\right) \left\{ 1 + \frac{\tau}{t_e} + \frac{V'\left(\frac{1}{t_e}\right)}{t_e V\left(\frac{1}{t_e}\right)} - \frac{V'\left(-\frac{1}{t_e}\right)}{t_e V\left(-\frac{1}{t_e}\right)} \right\} e^{-\tau t_e} + \sum B_i e^{\nu_i \tau} . \tag{40}$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РАСЧЕТА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И НАПРЯЖЕНИЯ

РЕЗЮМЕ

Исходя из теоретических и экспериментальных исследований колебаний нагрузки в электроэнергетических системах, а также из зависимости между функциями автокорреляции входных и выходных величин системы с данной функцией переноса, автор заключает, что для исследования качественных показателей регулирования частоты и напряжения можно использовать упрощенную функцию переноса, при условии, чтобы это упрощение было действительным в области комплексной переменной $|p| < 1$.

На основе расчетов, проведенных для простых схем с обычно применяемыми параметрами, выводится, что:

— простейшая функция переноса, могущая дать удовлетворительные результаты при исследовании регулирования частоты, имеет вид:

$$F(p) = -K \frac{t'p + 1}{(p + a)^2 + b^2} .$$

Полученные точные функции переноса, с учетом акселерометрического члена функций переноса и эффекта нечувствительности некоторых регуляторов скорости, эффекта параллельной работы генераторов, а также и эффекта изменения напряжения с точки зрения амплитуды и фазы, могут быть заменены упрощенной фукцией переноса вышеуказанного вида.

— Указывается, что, при исследовании регулирования напряжения, электроэнергетическую систему следует рассматривать как систему с двумя входными величинами, а именно колебаниями активной и реактивной мощности.

Даются рекомендации, касающиеся опытного определения параметров функции переноса данной системы.

BIBLIOGRAFIE

1. P. AILLERET, *L'introduction de la mesure dans la notion de la qualité du service d'une distribution d'électricité et son intérêt au point de vue de la conception des réseaux.* Bulletin de la Société Française des Electriciens; 7e série, **6**, *61*, 7—13 (1956).
2. В. А. ВЕНИКОВ, Л. А. СОВАЛОВ, *К вопросу о критериях качества электроэнергии и качества автоматического регулирования режима электросистем.* Электричество, *12*, 21 (1959).
3. E. ARIE, *Studiul pe modele probabilistice al fluctuațiilor sarcinilor în sisteme electroenergetice.* St. cerc. energ., **XI**, A, *3*, 471—488 (1962).
4. — *Studiul experimental al fluctuațiilor sarcinii cu aplicații la calculul fluctuațiilor puterii de schimb și la determinarea experimentală a caracteristicilor dinamice ale unui sistem electroenergetic.* St. cerc. energ., **XII**, A, *1*, 32—50 (1963).
5. — *Etude des fluctuations de la charge avec application au calcul des fluctuations de la puissance d'échange et à la détermination expérimentale des caractéristiques d'un système électroénergétique.* Revue d'Electrotechnique et d'Energétique. Acad. R.P.R., **VIII**, A, *2* (1963).
6. F. MANEA, S. IONESCU, P. NICOLAE, *Studiul optimizării reglajului automat al frecvenței și puterilor în sistemul electroenergetic cu ajutorul unui calculator analogic.* St. cerc. energ., **XIII**, *1* (1963).
7. С. А. СОВАЛОВ, С. Н. ЛЕЗНОВ, Н. М СМИРНОВ, *Экспериментальное исследование режимных характеристик энергосистемы.* Электричество, *11* (1958).
8. Н. В. ПЕУТИН, А. А. СУВОРОВ, *Исследование характеристик энергосистемы.* Электрические Станции, *4* (1951).
9. P. DIMO, *Le temps de lancer d'un réseau.* RGE, *12* (1960).
10. P. DIMO, L. GROZA, G. MORAITE, *L'optimisation des conditions d'essais pour la détermination des paramètres d'un réseau.* Rap. nr. *314*, GIGRÉ (1962).
11. E. ARIE, *Caracteristici nodale ale unui sistem electroenergetic și metode pentru determinarea lor experimentală.* I. *Caracteristici nodale de putere ale sistemelor electroenergetice interconectate radial în regim staționar.* St. cerc. energ., **XI**, *1*, 143—179 (1961).
12. — *Caractéristiques statiques nodales de puissance et indices intégraux de qualité de la tension et de la fréquence.* Revue d'Electrotechnique et d'Energétique, **VI**, *2*, 307—322 (1961).
13. L. K. KIRCHMAYER, *Economic control of interconnected systems.* J. Wiley—New York, 1959.

LUCRĂRI APĂRUTE ÎN EDITURA ACADEMIEI R.P.R.

CĂLIN ADRIAN VASILESCU, PERICLE SVORONOS şi VICTOR PIMSNER, **Exploatarea raţională a gazelor naturale**, 367 p. + 7 pl., 26,40 lei.

A. MORARU, **Amplidina (maşina electrică amplificatoare de curent continuu cu cîmp transversal)**, 328 p. + 2 pl., 14,90 lei.

GH. CARTIANU, **Modulaţia de frecvenţă** (în l. rusă), 579 p. + 7 pl., 39,10 lei.

TRAIAN SĂLĂGEAN, **Fenomene fizice şi metalurgice la sudarea cu arcul electric a oţelurilor**, 219 p., 12,10 lei.

GR. C. MOISIL, **Circuite cu tranzistori**, vol. I, 142 p., 8,25 lei; vol. II, 156 p., 8, 55 lei.

* * * **Probleme de automatizare. II. Folosirea maşinilor electronice de calcul în industrie şi economie. Extrase din lucrările prezentate la Consfătuirea asupra maşinilor electronice de calcul (ianuarie 1960)**, 171 p., 8,55 lei.

* * * **Probleme de automatizare. III. Sesiunea asupra problemelor teoretice şi practice privitoare la automatizările industriale (13 octombrie 1960)**, 188 p., 8,80 lei.

* * * **Probleme de automatizare. IV. Sesiunea asupra problemelor teoretice şi practice privitoare la automatizările industriale (noiembrie 1961)**, 264 p. + 3 pl., 13,50 lei.

C. PENESCU, **Automatica şi telemecanica sistemelor energetice**, vol. III, 417 p. + 9 pl., 30,20 lei.

N. TIPEI, V. N. CONSTANTINESCU, AL. NICA şi O. BIŢĂ, **Lagăre cu alunecare (calcul, proiectare, ungere)**, 436 p., 23,70 lei.

P. P. TEODORESCU, **Probleme plane în teoria elasticităţii**, vol. I, 996 p. + 6 pl., 42,80 lei.

E. ZAHARESCU, **Contribuţii la studiul capacităţii portante a fundaţiilor**, 300 p. + 4 pl., 16,40 lei.

V. VISARION, **Elemente pentru calculul plăcilor curbe subţiri elastice**, 385 p., 16,80 lei.

M. SOARE, **Application des équations aux différences finies au calcul des coques**, 460 p. + 8 pl., 33,80 lei.

* * * **Tehnica nucleară în sprijinul producţiei. Unele realizări ale Institutului de fizică atomică al Academiei R.P.R.**, 253 p. + 1 pl., 14,30 lei.

T. OROVEANU, **Scurgerea fluidelor prin medii poroase neomogene**, 329 p., 16,30 lei.

* * * **Sesiunea ştiinţifică jubiliară a Institutului de mecanică aplicată „Traian Vuia" al Academiei R.P.R.**, 445 p. + 1 pl., 23,30 lei.

F 2701 /A
B

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

SERIA A

1964 MAR 24

ENERGETICĂ GENERALĂ ŞI ELECTROENERGETICĂ

4

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
St. cerc. energ. Vol. 13 Nr. 4-A p. 451 — 618 Bucureşti 1963

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Seria A

ENERGETICĂ GENERALĂ ŞI ELECTROENERGETICĂ

Tomul XIII, nr. 4, 1963 Apare de 4 ori pe an

COMITETUL DE REDACŢIE

Acad. I. S. GHEORGHIU;
Acad. R. RĂDULEŢ,
— *redactor responsabil*;
Acad. A. AVRAMESCU,
Acad. M. BERCOVICI,
M. MARINESCU, membru corespondent al Academiei R.P.R.;
C. APETREI — *redactor responsabil adjunct*;
E. ARIE — *secretar ştiinţific*;
C. BĂLĂ;
CS. NAGY.

Redacţia: BUCUREŞTI, Şos. Vitan nr. 236

MTA Könyvtára
Nemzetközi
Kiadványcseréjéből

CONTRIBUȚII LA SISTEMATIZAREA INDICATORILOR DE CONSUM SPECIFIC DE ENERGIE

DE

V. CARACUDOVICI, J. GAYRAUD, N. MOLDOVEANU și CS. NAGY

620.93.004.15 :621.3.017.115

1. IMPORTANȚA, DEFINIȚIA ȘI SCOPURILE INDICATORILOR DE CONSUM SPECIFIC DE ENERGIE

Una din problemele importante ale economiei socialiste este cea a consumului rațional al resurselor materiale, pentru a cărei rezolvare corectă sînt necesare, între altele :

— cunoașterea, în fiecare etapă, a nivelului tehnic la care se realizează consumurile materiale pentru diversele scopuri productive și neproductive ;

— planificarea consumurilor respective, de la nivelul întreprinderii pînă la nivelul economiei naționale ;

— compararea eficienței economice, din punctul de vedere al consumurilor materiale, a diverselor procedee ce pot fi utilizate pentru realizarea unui anumit scop.

La aceste aspecte ale problemei, răspunsul este dat de indicatorii de consumuri materiale, care cuprind, pe de o parte, consumurile specifice realizate în diferitele perioade trecute și, pe de altă parte, valorile normate pentru aceste consumuri pentru perioadele viitoare.

Dintre consumurile materiale, un rol deosebit de important îl are consumul de energie de toate formele, deoarece :

— resursele de energie primară sînt limitate ;

— necesitățile de energie sînt în continuă creștere, energia fiind azi un element indispensabil dezvoltării tuturor ramurilor economiei naționale ;

— investiţiile şi duratele necesare pentru dezvoltarea extracţiei, preparării şi prelucrării combustibililor ca şi pentru instalaţiile de transformare a energiei primare în formele de energie utilizabilă necesară diverselor scopuri sînt proporţional mult mai importante decît în alte ramuri ale economiei naţionale.

De aici rezultă şi importanţa deosebită a indicatorilor de consumuri specifice de energie precum şi necesitatea reducerii acestor consumuri.

Această necesitate a economisirii energiei a fost subliniată de tovarăşul Gh. Gheorghiu-Dej în raportul prezentat la cel de-al III-lea Congres al Partidului Muncitoresc Romîn în care se arată că „Trebuie acordată o atenţie deosebită îmbunătăţirii randamentului cu care se folosesc combustibilii, carburanţii şi energia prin ridicarea nivelului tehnic al instalaţiilor producătoare şi consumatoare de energie, astfel încît consumurile specifice de combustibil să scadă în cursul planului de 6 ani în medie cu 19 la sută, iar cele de energie electrică cu 11 la sută" *).

Prin consum specific de energie se înţelege cantitatea de energie dintr-una sau mai multe forme sau purtători de energie, consumată în scopul realizării unei unităţi de produs, prestaţie sau activitate.

Această definiţie generală se referă atît la activităţile productive din industrie, construcţii-montaje, transporturi, agricultură etc., în care caz unitatea la care se raportează consumul specific de energie este unitatea de producţie, prestaţie sau activitate, cît şi la activităţile neproductive, din sectorul casnic, al ocrotirii sănătăţii, desfacerii mărfurilor, al instituţiilor etc. sau la indicatorii sintetici ai gospodăriei energetice ai unei ţări sau regiuni, în care cazuri consumul se raportează la o unitate care este specifică scopului consumului considerat (gospodărie, cap de locuitor, unitatea de suprafaţă etc.).

În lucrarea de faţă se vor trata numai problemele consumului de energie în ramurile productive, în care caz expresia „produs, prestaţie sau activitate" se înlocuieşte, pentru prescurtare, cu cuvîntul, „producţie".

Mărimea indicatorilor de consum specific de energie pentru ramurile productive aprobată pentru o anumită perioadă de timp reprezintă norma de consum de energie sau consumul specific de energie normat. Aceste norme se stabilesc, în general, pentru un număr limitat de consumatori de energie, consumatori care se fixează de către organele de stat în raport cu mărimea consumului lor şi cu necesităţile şi posibilităţile existente în fiecare etapă.

Evidenţa detaliată a indicatorilor de consum specific de energie, prin compararea cu normele corespunzătoare, permite un control riguros asupra gospodăririi energiei în întreprinderile consumatoare, avînd drept unul din roluri mobilizarea colectivelor de muncitori, tehnicieni şi ingineri, pentru descoperirea şi valorificarea rezervelor interne în domeniul energetic.

Normarea consumurilor specifice de energie implică studierea detaliată a consumurilor utile şi a pierderilor de energie, dînd în acest fel indicaţii preţioase asupra măsurilor necesare pentru economisirea energiei.

*) Gh. Gheorghiu-Dej, *Raport la cel de-al III-lea Congres al Partidului Muncitoresc Romîn*, Edit. politică, Bucureşti, 1960, p. 28.

Experiența Uniunii Sovietice, a țării noastre și a celorlalte țări socialiste demonstrează pe deplin rolul important pe care-l joacă normarea consumurilor specifice de energie în acțiunile de utilizare rațională a tuturor formelor de energie și de reducere a prețului de cost.

În afară de importanța pe care o are în evidența și urmărirea modului de utilizare a energiei, consumul specific de energie, ca indicator complex care face legătura între energetică și tehnologie, dă indicații prețioase și asupra desfășurării procesului tehnologic, arătînd prin variațiile lui situațiile anormale în funcționarea agregatelor tehnologice consumatoare de energie și în organizarea procesului de producție.

Cunoașterea cît mai precisă a indicatorilor de consum specific de energie realizați, precum și a dinamicii lor în viitor, fundamentează stabilirea necesităților de energie și structura acestora, elemente principale pentru planificarea de perspectivă atît în domeniul energetic cît și în general, ținînd seama de importanța deosebită pe care o are sectorul energetic pentru dezvoltarea întregii economii.

Pentru acest fapt este necesar ca indicatorii de consum specific de energie să fie stabiliți pe baza unei metodici unitare și științifice, prin studii detaliate la fiecare consumator de energie, care să cuprindă bilanțurile energetice corespunzătoare consumurilor analizate, iar normele să se stabilească pe baza optimizării — în etape — a bilanțurilor.

Îmbunătățirea continuă a întregului sistem de planificare cere ca, paralel cu îmbunătățirea metodelor de întocmire a planurilor, să se îmbunătățească și evidența elementelor fundamentale, dintre care, pentru sectorul energetic, evidența elementelor pe baza cărora se determină consumurile specifice de energie reprezintă factorul principal.

În sfîrșit, indicatorii de consum specific de energie reprezintă elemente de bază de care trebuie să se țină seama la aprecierea comparativă a eficienței energo-economice a instalațiilor existente și a celor ce urmează a se construi, atît în domeniul producerii, transportului și distribuției diferitelor forme de energie cît și în domeniul consumului.

Alături de ceilalți indicatori tehnico-economici, cei de consum de energie fundamentează calculele tehnico-economice pentru aprecierea introducerii tehnicii noi și, în unele condiții, pentru procesele tehnologice energo-intensive, pot deveni chiar criterii de alegere. Este util, din acest punct de vedere, să se stabilească și indicatorii complecși de consum specific de energie, care să țină seamă de mai multe sau de toate formele de energie care vin în considerare într-un anumit proces de producție.

2. NECESITATEA SISTEMATIZĂRII INDICATORILOR DE CONSUM SPECIFIC DE ENERGIE ȘI A UNEI METODICI PENTRU STABILIREA LOR

Astăzi, după circa zece ani de activitate în domeniul urmăririi consumurilor specifice de energie, deși s-au obținut rezultate deosebit de importante în ceea ce privește economiile de energie și îmbunătățirea indicatorilor de consum specific de energie realizați, situația generală a stabilirii lor nu mai corespunde necesităților.

Dacă la început, scopul principal al acțiunii a fost axat pe îmbunătățirea evidenței și pe controlul modului de utilizare a energiei la consumator, pentru a se obține economii de energie cît mai însemnate în termen scurt, acum atenția trebuie îndreptată asupra sistematizării indicatorilor folosiți pentru a-i face să corespundă cît mai bine cerințelor planificării energetice și pentru aprecierea comparativă a eficienței energo-economice și a adîncirii în continuare, a posibilităților de economisire a energiei.

Indicatorii și normele de consum de energie introduși pînă acum la noi în țară nu au constituit, „un sistem de indicatori" în sensul științific al acestei noțiuni, ci numai un „ansamblu de indicatori" compus din indicatori pentru consumuri de anumite forme de energie, consumuri care au fost alese pentru a fi urmărite și normate numai pe criteriul ponderii cu care ele intrau în consumul total al industriei, transporturilor, agriculturii *).

Din această cauză, indicatorii folosiți pînă acum au corespuns doar parțial scopurilor de analiză, planificare, control și comparare a eficienței energetice. Astfel :

a. Normarea și urmărirea consumurilor s-a limitat numai la două forme de energie : energie electrică și combustibil, consumul de combustibil incluzînd atît combustibilul ars direct cît și cel corespunzător producerii căldurii folosite în proces, provenind din abur și apă caldă. Desigur că în acest fel se poate cuprinde întreaga energie folosită în procesul respectiv, dar :

— nu se favorizează analiza randamentelor diverselor transformări energetice din cadrul procesului și nici a utilizării resurselor energetice secundare ;

— nu se poate planifica necesarul de abur și apă caldă și nici combustibilul corespunzător, combustibil care, în general, poate fi altul decît cel ars direct în procesul tehnologic (acesta trebuind să îndeplinească de obicei, condiții speciale, care nu sînt necesare combustibilului folosit în cazanele de abur și apă caldă) ;

— pe ansamblul economiei, se pot produce duble înregistrări de consum, cînd un consumator oarecare își procură, total sau parțial, aburul sau apa caldă necesară din exteriorul întreprinderii sale, de exemplu dintr-o rețea de termoficare.

b. Indicatorii de consum specific de energie electrică se stabileau pentru o anumită parte a unui proces de producție, iar cei de consum specific de combustibil de obicei erau stabiliți pentru o altă parte a aceluiași proces. În această situație, ca și în cazul cînd pentru anumite procese sau părți de proces nu se stabilea decît sau consumul specific de energie electrică sau consumul specific de combustibil, nu se putea calcula un

*) După cunoștința autorilor, situația este aceeași și în celelalte țări ; autorii nu au cunoștință nici de studii pentru stabilirea unui sistem științific de indicator de consum specific de energie.

consum complex de energie (care să cuprindă toate formele de energie folosite), ceea ce nu permitea în general o comparare corectă a eficienței energetice a diferitelor procese de producție.

c. Lipsa de sistematizare a indicatorilor actuali nu a fost de natură să favorizeze elaborarea unor instrucțiuni de stabilire și normare a indicatorilor menționați, din care cauză, la deficiențele congenitale ale sistemului („sistem" luat nu în sens științific, ci în sens de „ansamblu de indicatori") s-a adăugat, în practica aplicării, o serie de alte deficiențe, ca, de exemplu :

— neluarea în considerație a intrărilor, ieșirilor și stocărilor în și din anumite puncte ale fluxului procesului tehnologic a unor cantități de materii prime, materiale, semifabricate sau produse provenind din cooperarea întreprinderilor între ele sau a diverselor secții sau linii tehnologice, ceea ce poate deforma foarte mult consumul specific din cadrul întreprinderilor (fără a deforma totuși indicatorul sintetic pe ramură) ;

— structura diferită de la întreprindere la întreprindere a unui același indicator (excepție au făcut, în general, indicatorii din industria petrolului și din industria ușoară).

În concluzie, se poate spune că sistemul actual nu este suficient de analitic pentru a permite analiza consumurilor și nu permite o sinteză, deci nu poate conduce la stabilirea de indici complecși și la posibilitatea comparării cu indicatori similari din alte țări, chiar dacă aceștia ar forma un sistem unitar, de o structură rațională.

Din punctul de vedere al activității de cercetare în prima fază s-a pus problema precizării unor metode practice pentru determinarea, normarea și reducerea consumurilor specifice de energie, sarcină realizată prin lucrarea de sinteză *Metodologia normării și reducerii consumurilor specifice de energie în industrie*, elaborată în 1956 de Institutul de energetică, pe baza unor studii concrete asupra diferitelor ramuri industriale. În momentul actual, într-o fază mai avansată, s-a simțit necesitatea reluării cercetărilor metodice, spre a se îmbunătăți în special structura și sistematizarea indicatorilor de consum specific de energie.

3. PRINCIPIILE DE BAZĂ NECESARE PENTRU UN SISTEM RAȚIONAL DE INDICATORI DE CONSUM SPECIFIC DE ENERGIE

În afară de scopurile generale amintite mai sus, un sistem rațional de indicatori de consum specific de energie trebuie să răspundă și următoarelor condiții :

— să fie aplicabil în toate sectoarele de activitate ale economiei naționale : industrie, transport, agricultură etc. ;

— să ia în considerare toate formele de energie care intervin în procesele de producție ;

— să fie aplicabil la toate nivelele : de la întreprindere, pînă la o ramură a economiei și economia națională în ansamblul ei, iar în interiorul întreprinderii, în măsura posibilităților, pînă la locul de muncă ;

— să acopere, la fiecare din nivelele menționate, întregul consum de energie, fără duble înregistrări;

— să fie suficient de analitic, pentru ca prin combinări între diferiții indicatori să permită stabilirea de indicatori noi pe orice structură rațională, spre a se putea realiza compararea cu indicatorii analogi, din alte țări;

— să permită, pentru fiecare proces sau activitate, determinarea consumului total de energie (consumul complex), în scopul comparării eficienței energetice a diferitelor procese tehnologice care realizează aceeași producție.

În acest sens, la alcătuirea unui sistem rațional de indicatori trebuie adoptate o serie de principii generale, care sînt tratate în cele ce urmează.

3.1. CLASIFICAREA CONSUMURILOR SPECIFICE DE ENERGIE

După cum rezultă din definiția dată la punctul 1, indicatorii de consum specific de energie, și deci normele de consum de energie, se pot clasifica atît din punctul de vedere al formei sau purtătorului de energie la care se referă cît și din punctul de vedere al scopului pentru care s-a efectuat consumul de energie respectiv.

Din punctul de vedere al formelor și purtătorilor de energie se disting:

— indicatori simpli de consum specific de energie, care se referă la o singură formă sau purtător de energie, consumat într-un anumit scop în cadrul unei anumite activități;

— indicatori complecși de consum de energie care rezultă din combinarea celor simpli după un anumit sistem.

Apar în acest fel indicatori complecși care se referă, pentru o anumită activitate, la mai multe forme de energie sau la toate formele de energie considerate, consumate într-un anumit scop, indicatori complecși, pentru o aceeași activitate, care se referă la o aceeași formă de energie, consumată însă în scopuri diferite, și indicatori complecși, care se referă în același timp la mai multe forme de energie și la mai multe scopuri, toate în cadrul unei anumite activități.

Pentru clasificarea indicatorilor de consum de energie din punctul de vedere al scopului consumului, trebuie avut în vedere în primul rînd că activitatea unei întreprinderi constă atît din realizarea unei anumite producții (de bază și anexă) pentru care a fost înființată întreprinderea respectivă, cît și din activități auxiliare, de deservire generală a proceselor de producție (de bază și anexe). Pe de altă parte, trebuie observat că în consumul de energie necesar realizării producției (de bază și anexă) intră atît consumurile de energie corespunzătoare proceselor de producție propriu-zise (corespunzătoare tehnologiilor și utilajelor principale și auxiliare folosite), cît și o serie de consumuri de energie auxiliare, corespunzătoare creierii condițiilor de bună desfășurare a proceselor de producție menționate, consumuri auxiliare care nu au legătură directă cu procesele de pro-

ducție ci depind, în principal, de alți factori, în această categorie intrînd consumurile pentru iluminat, încălzire, ventilație, condiționare, care sînt funcție de condițiile exterioare naturale (iluminare, temperatură etc.). Fac excepție cazurile cînd aceste consumuri sînt strîns legate de tehnologie (cum sînt de exemplu, iluminatul în cinematografie, condiționarea în industria textilă etc.), cazuri în care ele trebuie incluse în consumul proceselor de producție propriu-zise (de bază și anexe). De asemenea, trebuie remarcat că din consumul pentru procesele propriu-zise ale producției de bază și anexă (care constituie întotdeauna marea majoritate a consumului unei întreprinderi), cea mai importantă parte (sau chiar integral) revine unui număr relativ mic de producții, fiecare cu un consum important, iar o parte mult mai mică, (uneori nulă) revine pentru realizarea unui număr relativ ridicat de producții, fiecare cu un consum redus.

Ținînd seama că evidența consumurilor și urmărirea lor, nu trebuie să fie prea greoaie, că planificarea necesarului de energie se poate face detaliat numai pentru acoperirea activităților principale și global pentru rest, că indicatorii de consum nu trebuie să depindă de elemente exterioare procesului pentru care sînt stabiliți, pe baza celor arătate mai înainte, rezultă următoarele categorii de indicatori de consum specific de energie :

a) indicatori pentru fiecare din producțiile de bază sau anexe, cu pondere mare în consumul global, indicatori pe care îi vom denumi indicatori principali și cărora trebuie să li se acorde o atenție deosebită în urmărire și normare ;

b) indicatori pentru restul consumurilor, pe care îi vom denumi indicatori auxiliari ; în această categorie intră :

— indicatori pentru ansamblul restului de producție de bază sau anexă ;

— indicatori pentru ansamblul proceselor de deservire generală a întreprinderii ;

— indicatori de iluminat ;

— indicatori de încălzire, ventilație, condiționare.

Trebuie să se observe că activitatea de manipulare, depozitare, producere, transport și distribuție a diferiților purtători de energie, constituie, în întreprinderile neenergetice (și acestea sînt imensa majoritate) o activitate de deservire. În sistemul de indicatori de consum de energie însă, indicatorii de consum specific de energie corespunzători manipulării, depozitării, producției, transportului și distribuției de energie de diverse forme, constituie o parte importantă, principală. Din această cauză apare ca normal și necesar ca acești indicatori, chiar într-o întreprindere neenergetică, să fie evidențiați în mod special, și anume indicatorii consumurilor specifice pentru producerea diverselor forme sau purtători de energie să fie incluși în indicatorii principali, iar indicatorii de pierderi în rețelele energetice și în manipularea și depozitarea combustibililor să constituie o a cincea subcategorie de indicatori auxiliari.

3.2. FORMELE ŞI PURTĂTORII DE ENERGIE CORESPUNZĂTORI UNUI SISTEM RAŢIONAL DE INDICATORI

După cum s-a arătat mai înainte, un sistem raţional de indicatori de consum specific de energie trebuie să ia în considerare toate formele şi toţi purtătorii de energie care intervin în procesele pentru care se determină indicatorii respectivi. O analiză a fenomenelor arată însă că o serie de forme şi purtători de energie intermediari şi finali nu este necesar şi nici practic nu este posibil să fie cuprinşi în sistemul de indicatori. Este vorba anume de acele forme şi purtători de energie care apar numai în interiorul unui agregat de lucru (energetic sau tehnologic *) —, şi care nu au intrat şi nu ies din acel agregat sub forma sau formele respective. În această situaţie se găseşte întotdeauna energia mecanică **) şi energia în forma de utilizare finală (prin utilizare finală a energiei înţelegînd utilizarea energiei într-un proces al cărui scop nu este de a se mai livra în continuare vre-un fel de energie sau purtător de energie; de exemplu, energia chimic legată care apare într-un proces de electroliză este forma finală de energie, scopul procesului fiind producerea anumitor produse chimice; energia mecanică folosită de un strung este tot o formă de energie finală, scopul procesului fiind prelucrarea prin aşchiere iar produsul fiind piesa strunjită; de asemenea, căldura din aburul folosit în calandrele unei maşini de fabricat hîrtia este o formă finală, scopul procesului fiind uscarea filmului de pastă de hîrtie; în schimb, energia mecanică transmisă de la un motor primar la un generator electric sau căldura aburului intrat într-o turbină, nu sînt forme de utilizare finală, întrucît procesele respective au drept scop producerea de energie electrică, respectiv de energie mecanică).

Ca un exemplu de forme intermediare de energie din cadrul unui agregat, citǎm cazul unui grup electrogen cu turbină cu abur, în care căldura, intrată în turbină prin purtătorul de energie care este aburul, se transformă în energie mecanică la arborele turbinei şi apoi, în final, în energie electrică în generatorul electric. Indicatorii de consum pentru formele intermediare, în acest caz şi în toate cele analoge, nu interesează deoarece ei nu ar reprezenta, în fond, decît inversul randamentelor energetice ale transformărilor respective, care sînt însă numai nişte randamente parţiale, iar ceea ce interesează în special este randamentul total. În plus, nici nu există metode pentru măsurarea permanentă şi deci pentru evidenţa nici uneia din cantităţile de energie din formele intermediare respective (determinarea lor se poate face parţial numai teoretic, în cadrul bilanţurilor energetice ale proceselor considerate, iar măsurarea lor se poate face numai pentru unele forme şi numai în cadrul unor încercări speciale). Aceleaşi probleme se ridică şi pentru formele de utilizare finală a energiei. Trebuie subliniat că

*) Expresia de energetic, respectiv tehnologic, aplicată la un utilaj sau la un proces are, în cadrul articolului de faţă, înţelesul de proces sau utilaj de transformare a unei forme sau purtător de energie în altă formă sau purtător, respectiv de proces sau utilaj destinat a realiza o altă operaţie, de realizare a unor produse sau activităţi neenergetice.

**) În măsura în care, în cazul acţionărilor prin transmisii (pe cale de dispariţie în tehnica modernă), se admite că aceste transmisii sînt înglobate în agregat.

formele de energie pentru care s-a arătat mai sus că se elimină indicatorii de consum specific sînt cuprinse în sistemul de indicatori de consum specific de energie prin indicatorul de consum din forma inițială din care provin ele raportat la produsul (energetic sau tehnologic) rezultat din ultima formă de energie neluată în considerare.

Mai sînt însă și alte forme sau purtători de energie care nu este necesar să fie luați în considerație în cadrul sistemului de indicatori de consum specific de energie, și anume acelea pentru a căror producere societatea nu a cheltuit nimic, ci se iau direct din natură cum sînt : căldura sensibilă a aerului ambiant folosit drept comburant, căldura sensibilă a apei din natură sau a materiilor prime sau materialelor folosite într-un proces tehnologic sau energietic, și care se găsesc la temperatura ambiantă, energia cinetică a vîntului sau apelor, energia solară folosită în bateriile solare etc.

O problemă care trebuie discutată — întrucît în diverse țări ea este rezolvată diferit — este cea a oxigenului folosit drept comburant și cea a energiei de presiune a fluidelor sub presiune *).

Sînt acestea forme sau purtători de energie? Părerea autorilor este că oxigenul nu este un purtător de energie, ci trebuie considerat ca o materie primă, ca un material folosit într-un proces oarecare, deoarece prin el însuși nu dezvoltă nici un fel de energie. El activează, intensifică, este drept, procesele de ardere a combustibililor sau a altor materiale dar fără a micșora consumul de combustibil sau energie electrică decît în măsura în care scurtează durata unui proces și, prin aceasta, micșorează pierderile proporționale cu durata procesului. Dar și alte materiale decît oxigenul pot conduce la o scurtare a duratei unui proces și la micșorarea deci a consumurilor specifice de energie, dar pentru aceasta ele nu au fost niciodată considerate purtători de energie (de exemplu, diverși catalizatori, diverse adausuri etc.); numai faptul că oxigenul se produce cu un consum specific ridicat de energie electrică și că, în procesele de carburare în care se folosește oxigenul, această operație are loc cu un consum relativ mare de oxigen, nu pot justifica considerarea oxigenului drept purtător de energie.

În ceea ce privește energia de presiune a fluidelor sub presiune, autorii sînt de părere că nu trebuie luată în considerare ca o formă de energie în cadrul indicatorilor de consum specific de energie decît în cazul cînd are un rol energetic bine definit, nu și în cazul cînd este necesară numai unui proces tehnologic de altă natură, cum este cazul marii majorități a fluidelor sub presiune din industria chimică, unde presiunea este necesară, realizării diverselor reacții chimice; apa sub presiune de asemenea nu trebuie considerată drept purtător de energie, decît în cazul cînd ar fi folosită pentru producerea de energie, de exemplu în cazul centralelor hidroelectrice, al hidromecanizării, în cazul fenomenelor sonice — care

*) Este vorba numai de fluidele care se găsesc fie la temperatura mediului ambiant fie la o temperatură mai ridicată la care energia provine numai din fenomenul de ridicare a presiunii, nu dintr-un proces de încălzire (în caz contrar, fluidele respective sînt considerate ca purtători de căldură).

însă încă nu au aplicații energetice practice răspîndite, — în cazul transportului hidraulic; analog este cazul aerului comprimat care nu trebuie considerat ca purtător de energie decît în măsura în care este folosit în scopuri mecanice: la unelte și mașini pneumatice, la aparate de sablaj, la transportul pneumatic al unor produse. Consumul de fluide sub presiune în scopuri neenergetice trebuie considerat ca un consum de materie primă; consumul de energie pentru producerea acestor fluide este însă desigur un consum energetic, care trebuie urmărit și normat ca atare în cadrul indicatorilor de consum specific de energie ai proceselor tehnologice din care provin sau care folosesc aceste fluide.

Ținînd seama de cele arătate mai sus, rezultă în final că formele și purtătorii de energie care rămîn să fie luați în considerare în sistemul indicatorilor de consum specific de energie, sînt:

— *energia chimic legată* ai cărei purtători de energie sînt: combustibilii tehnici, naturali-bruți, preparați sau prelucrați (cărbuni, lemne, produse petrolifere, gaze naturale etc.), industriali sau rezultați ca resurse energetice secundare (gazul de gazogen, gazul de furnal, gazul de cocserie hidrogenul, acetilena, deșeurile combustibile etc.), în măsura în care sînt folosiți în scopuri energetice și nu ca materie primă (de ex. gazul metan folosit pentru producerea negrului de fum sau a acetilenei, acetilena folosită pentru producerea policlorurii de vinil, etc. nu trebuie considerați ca producători de energie, iar energia chimic legată corespunzătoare nu trebuie considerată în indicatorii de consum specific de energie; tot ca materie primă trebuie considerate cantitățile de combustibili efectiv supuse unui proces de preparare sau prelucrare care nu are caracter preponderent energetic, cum sînt cărbunii supuși spălării sau brichetării într-o spălătorie de cărbuni, respectiv într-o instalație de brichetare, țițeiul prelucrat într-o rafinărie; cărbunele folosit într-o cocserie nu trebuie însă considerat drept materie primă, deoarece transformarea lui în cocs se face prin ardere parțială, proces care are caracter preponderent energetic). Consumul de energie chimic legată se poate exprima fie în unități de căldură, fie în cantitățile corespunzătoare de combustibil însoțite de indicația puterii lor calorifice inferioare, fie în cantitățile echivalente de combustibil convențional;

— *căldura*, purtătorii de energie respectivi fiind materialele cu temperatură superioară sau inferioară celei a mediului ambiant; consumul de căldură se poate exprima fie în unități de căldură, fie în cantități echivalente de combustibil convențional;

— *energia electrică*, al cărui consum se exprimă de obicei numai în unități de energie electrică;

— *energia de presiune a fluidelor sub presiune*, numai în măsura în care aceste fluide sînt destinate a efectua un lucru mecanic în cadrul unui proces tehnologic sau energetic; consumul se exprimă în Nm^3 în cazul gazelor, respectiv în tone forță în cazul lichidelor.

După cum se vede, în cele de mai sus s-a prevăzut, în general, ca indicatorii de consum să exprime, așa cum este normal, însuși consumul de energie, din forma de energie considerată, cu excepția cazului energiei de presiune a

fluidelor sub presiune, în care indicatorii de consum exprimă nu consumul de energie, ci consumul de purtător de energie. Această ultimă prevedere, deşi teoretic nu este pe deplin mulţumitoare, este practic singura posibilă, pe de o parte, din cauza imposibilităţii de măsurare a energiei mecanice şi, pe de altă parte, din cauza dificultăţilor de a calcula, chiar teoretic, această energie în cazurile citate. Se menţionează însă că, în fond, consumul de energie respectiv este prins în sistemul de indicatori, prin produsul dintre indicatorul de consum corespunzător aducerii sub presiune a fluidului respectiv şi indicatorul de consum de purtător de energie.

Pentru a permite stabilirea de indicatori complecşi de energie, consumul din formele şi purtătorii de energie menţionaţi trebuie să apară diferenţiat, pentru fiecare proces de producţie, după felul în care ei iau parte în procesele de consum şi anume :

— căldura chimic legată a combustibililor poate interveni într-un proces (tehnologic sau energetic) fie direct prin arderea directă în cadrul procesului (de ex. în cuptoarele pirotehnologice), fie indirect, prin arderea în instalaţii de producere de purtători de căldură (de exemplu cazane de abur sau apă caldă) care intervin direct în procesul tehnologic, fie, tot indirect, prin combustiune în motoare cu combustiune internă, în care caz energia mecanică produsă de aceste motoare este cea care intervine direct în procesele consumatoare ;

— căldura din abur poate de asemenea să fie folosită fie direct în procesele consumatoare, pentru încălzire, fie indirect, prin acţionarea motoarelor cu abur sau producerea de alţi purtători de căldură în schimbătoare de căldură, în aceste cazuri energia mecanică produsă de motoarele cu abur, respectiv noii purtători de energie, fiind cei care intervin direct în procesele consumatoare ; căldura din ceilalţi purtători de căldură poate fi de asemenea folosită fie direct în procesele consumatoare, pentru încălzire, fie indirect, prin producerea de alţi purtători de căldură în schimbătoare de căldură, în acest caz noii purtători de căldură fiind cei care intervin direct în procesele de consum ;

— energia electrică poate şi ea să fie folosită fie direct în procesele de consum (acţionări de utilaje — cu excepţia celor care produc fluide sub presiune folosite în scopuri energetice — cuptoare electrice, instalaţii de electroliză, de iluminat etc.), fie indirect, prin acţionare de pompe şi compresoare care produc fluide sub presiune folosite în scopuri energetice, aceste fluide fiind cele care iau parte direct în procesele consumatoare.

Întrucît în acţiunea de economisire a energiei un rol deosebit de important revine folosirii resurselor energetice secundare, sistemul de indicatori, pentru toate formele şi purtătorii de energie consideraţi, trebuie să prevadă, în mod distinct, indicatorii din formele şi purtătorii de energie proveniţi din resursele secundare, de celelalte forme şi purtători de energie, naturali sau realizaţi prin transformări energetice corespunzătoare acestor scopuri.

3.3. ASOCIEREA INDICATORILOR DE CONSUM SPECIFIC DE ENERGIE LA CONTURURILE ÎN CARE AU LOC CONSUMURILE. CONTURURILE CARE TREBUIE LUATE ÎN CONSIDERARE

3.3.1. Consideraţii generale

Orice proces de producţie şi orice ansamblu de astfel de procese se desfăşoară într-una sau mai multe porţiuni de spaţiu delimitată sau delimitate de una sau mai multe suprafeţe închise care constituie conturul acelui sau acelor procese, contur în interiorul căruia are loc consumul de energie. Indicatorii de consum specific de energie nu reprezintă deci, conform definiţiei lor, decît consumurile efective de energie dintr-un contur, raportate la volumul producţiei ieşite din interiorul aceluiaşi contur.

3.3.1.1. *Consumul efectiv dintr-un contur.* Prin consum efectiv dintr-o anumită formă sau purtător de energie (formă sau purtător de energie în sensul definit la punctul 3.2) în interiorul unui contur, se înţelege diferenţa dintre cantitatea de energie de forma considerată intrată în contur şi cantitatea de energie de aceeaşi formă ieşită din contur ca resursă energetică secundară, numai în măsura în care această cantitate ieşită este folosită într-un alt contur (în caz contrar cantitatea ieşită nu se scade din energia intrată, ci se include în consumul efectiv al conturului considerat). În cazul cînd în interiorul unui contur au loc şi transformări de energie dintr-o formă în alta, se poate întîmpla ca pentru anumite forme de energie care apar ca resurse energetice secundare să rezulte consumuri efective negative, deci şi indicatori de consum specific negativi, dacă, conform celor arătate mai înainte, resursa secundară este folosită într-un alt contur decît cel în care a fost generată; sensul de „consum negativ" rezultă aici prin opoziţie cu cel de „consum" (subînţeles „pozitiv") şi indică faptul că în conturul dat a avut loc nu un consum ci o producţie de energie de o anumită formă diferită de cea intrată, bineînţeles cantităţile de energie ieşite fiind în total mai mici decît cele intrate sau, în anumite cazuri, pe baza unei convenţii, cum se va arăta mai jos, egale cu acestea. De exemplu, în cazul unui cuptor industrial în care se consumă combustibilul în scopul încălzirii unor piese, rezultă gaze calde care — să presupunem — sînt folosite la un alt proces; în acest caz, în conturul care închide cuptorul intrînd energia chimic legată a combustibilului folosit şi ieşind căldură sub formă de gaze calde (care se foloseşte în afara conturului cuptorului) vor exista doi indicatori de consum : unul pozitiv, corespunzător consumului de combustibil şi altul negativ, corespunzător căldurii din gazele calde, cel negativ fiind în valoare absolută mai mic decît cel pozitiv (dacă sînt exprimate în aceleaşi unităţi de măsură, de exemplu kilocalorii).

Prin înţelesul dat mai sus consumului efectiv de energie dintr-un contur şi atribuirii semnului minus resursei energetice secundare generate într-un contur , pe de o parte se evită posibilitatea dublelor înregistrări a unor consumuri atunci cînd se adună indicatorii de consum ai mai multor contururi spre a obţine indicatorii ansamblului astfel format, şi pe de altă

parte se pune în evidență folosirea resurselor secundare. În acest sens, în cazul cînd resursa secundară este folosită prin intermediul unui utilaj recuperator care livrează energie unui alt contur decît cel în care a fost generată resursa secundară, este necesar ca utilajul recuperator respectiv să fie închis într-un contur independent.

După cum s-a văzut la punctul 3.2, în anumite procese tehnologice combustibilii nu au rol de purtător de energie ci de materie primă. Dacă însă din combustibilul intrat într-un astfel de proces rezultă și o resursă energetică secundară, pentru ca energia aesteia să apară, așa cum este efectiv, ca rezultat al unei transformări energetice, este logic să se împartă combustibilul intrat în conturul procesului în două părți : o parte care să fie considerată efectiv ca materie primă și o a doua parte care să fie socotită ca purtător de energie.

Separarea acestor două părți, în cele mai multe cazuri nu se poate face pe considerente teoretice și este deci necesar să se apeleze la o convenție, deoarece scopul care a generat consumul total de combustibil intrat în contur nu a fost producerea resursei energetice secundare, cea mai logică și cea mai simplă convenție este de a considera că transformarea combustibilului în resursa secundară s-a realizat fără pierderi, cu randament egal cu 1, toate pierderile de combustibil care însoțesc procesul total din contur fiind astfel afectate scopului principal al acestui proces.

În cazul cînd o resursă energetică secundară rezultă în urma unei reacții exoterme în care nu intervine (sau intervine în măsură redusă) un combustibil, ci alte materiale, energia acestei resurse (în măsura în care este folosită în alt proces) are numai aparența că nu rezultă din altă energie, deoarece consumurile de alte materiale decît combustibilii nu se iau în considerare în sistemul de normare.

3.3.1.2. *Determinarea contururilor necesare de considerat.* Cel mai cuprinzător contur este cel al ansamblului economiei naționale, pentru care se stabilesc indicatori de consum specific de energie cu caracter cu totul sintetic, general. Acest contur se împarte apoi, potrivit diverselor nevoi de planificare, evidență și control, ale organelor superioare de stat, în contururi din ce în ce mai mici, corespunzînd la diferite puncte de vedere și anume :

— contururi pe ramurile economiei naționale, în cadrul acestora contururi pe subramuri (de ex. ramuri ale industriei), apoi pe producțiile specifice etc. ;

— contururi pe zone teritoriale ;

— contururi pe organizații economice centrale (ministere etc.) iar în cadrul acestora în contururi pe întreprinderi sau unități subordonate și pe producții specifice etc.

Această descompunere în contururi din ce în ce mai mici trebuie să se limiteze, din punctul de vedere al necesităților amintite ale organelor centrale de stat, la contururile corespunzătoare proceselor de realizare a principalelor producții, care trebuie nominalizate într-un nomenclator, plus cîteva contururi — aceleași pentru toate întreprinderile — corespun-

zătoare clasificării (expuse la punctul 3.1) indicatorilor de consum după scopul consumului (şi anume : consum pentru restul producţiei de bază şi anexe, consum pentru ansamblul proceselor de deservire generală din cadrul unei întreprinderi, consum pentru iluminat, consum pentru încălzire, ventilaţie, condiţionare, consum corespunzător pierderilor în reţelele energetice şi depozitării şi manipulării combustibililor).

Este însă necesar ca nomenclatorul menţionat să cuprindă uneori şi acele subproduse care pot interveni mai mult sau mai puţin curent şi cu o pondere cît de cît importantă în cooperarea dintre întreprinderi ; această necesitate rezultă din obligativitatea — ce se va demonstra mai departe — a secţionării conturului unui proces în punctele în care au loc astfel de schimburi prin cooperare. Rezultă că stabilirea nomenclatorului trebuie să aibă la bază nu numai importanţa consumului de energie dintr-un proces, ci şi o studiere atentă a schemei proceselor tehnologice şi a posibilităţilor de cooperare între întreprinderi.

Pentru stabilirea corectă a indicatorilor de consum specific de energie corespunzători unui proces de realizare a unei anumite producţii, în cadrul unei întreprinderi, este necesar, în unele cazuri care se vor arăta mai jos, să se împartă conturul corespunzător procesului considerat în contururi parţiale, stabilindu-se indicatori pentru fiecare din aceste contururi.

Astfel, de-a lungul fluxului unui proces tehnologic, în afară de materiile prime şi de materialele care intră în prima fază a procesului şi în afară de produsele care ies din ultima fază a acestuia, între fazele componente ale procesului pot avea loc intrări şi ieşiri de materii prime şi materiale, respectiv de produse. Consumul specific fiind funcţie de volumul producţiei realizate, este deci necesar să se descompună conturul unui proces de producţie, al unui produs oarecare din nomenclator, în contururi parţiale corespunzătoare porţiunilor din ansamblul procesului separate între ele atît de punctele fluxului tehnologic în care pot intra, din exteriorul întreprinderii, prin cooperare materiale de acelaşi fel ca cele rezultate din porţiunea anterioară a procesului, cît şi de punctele fluxului tehnologic din care poate ieşi o parte a producţiei realizate (ca produse intermediare finite sau ca materiale necesare altui proces de producţie din întreprinderea considerată sau din întreprinderi cu care aceasta cooperează). De exemplu, pentru procesul tehnologic al preparării bumbacului (fig.1), trebuie să se separe procesul tehnologic în punctele în care se pot introduce sau se pot scoate fire brute sau preparate şi ţesături brute.

De asemenea, trebuie avut în vedere că un proces de realizare a unui produs se poate reduce întotdeauna, din punctul de vedere al determinării indicatorilor de consum specific de energie, la porţiuni de tip serie (în care diferitele operaţii se succed una după alta) (fig.2) sau de tip ramificat (fig.3)*) care se poate prezenta sub două variante şi anume :

*) Tipul de proces paralel, cînd anumite agregate linii sau porţiuni de linii tehnologice, pornind de la aceleaşi materii prime sau materiale realizează produse identice prin tehnologii identice, se poate întotdeauna reduce, din punctul de vedere al indicatorilor de consum specific de energie la tipul serie sau ramificat prin cumularea consumurilor de energie şi a producţiilor realizate.

— cînd subprodusele — diferite între ele — realizate în două sau mai multe porțiuni ale procesului se reunesc pentru prelucrare în comun în continuare (cazul *a*, din fig. 3);

— cînd un subprodus realizat se împarte în două sau mai multe părți care suferă în continuare prelucrări diferite (cazul *b*, din fig.3).

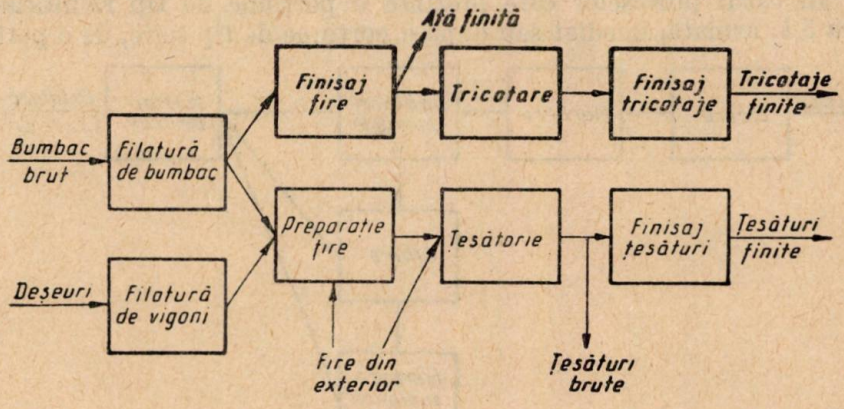


Fig. 1. — Schema tehnologică principială a prelucrării bumbacului și cooperarea cu alte procese.

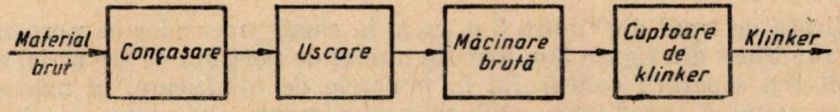


Fig. 2. — Schema tehnologică principială a unui proces serie.

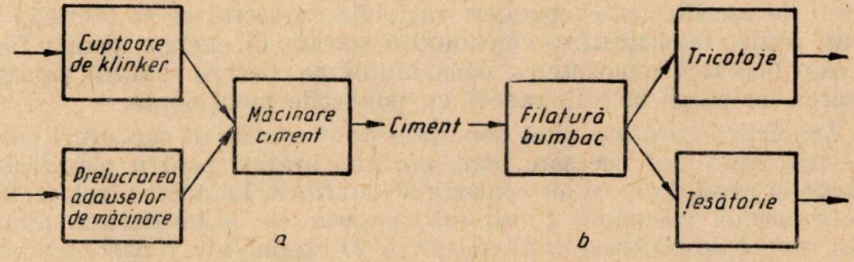


Fig. 3. — Scheme tehnologice principiale ale unor procese tehnologice de tip ramificat.

În cazul proceselor (sau porțiunilor de proces) de tip serie, împărțirea conturului lor total în contururi parțiale nu ridică alte probleme decît cele expuse mai înainte. În cazul procesului ramificat de tipul din figura 3 *b*, în măsura în care ramificarea este în partea finală a procesului, conducînd adică la realizarea de produse finite diferite sau cel puțin de sorturi diferite, este necesar să se separe conturul total și în punctul de

ramificaţie, spre a se putea cunoaşte consumurile specifice prin fiecare din produsele sau sorturile ce se realizează. Se dă ca exemplu procesul tehnologic pentru fabricarea celulozei (fig.4), unde fluxul tehnologic se împarte în final pe ramificaţii specializate pentru producerea diferitelor grupuri de sortimente de celuloză.

În cazul proceselor care prezintă o porţiune de tip ramificat din figura 3 *b*, urmată, imediat sau după o porţiune de tip serie, de o porţiune

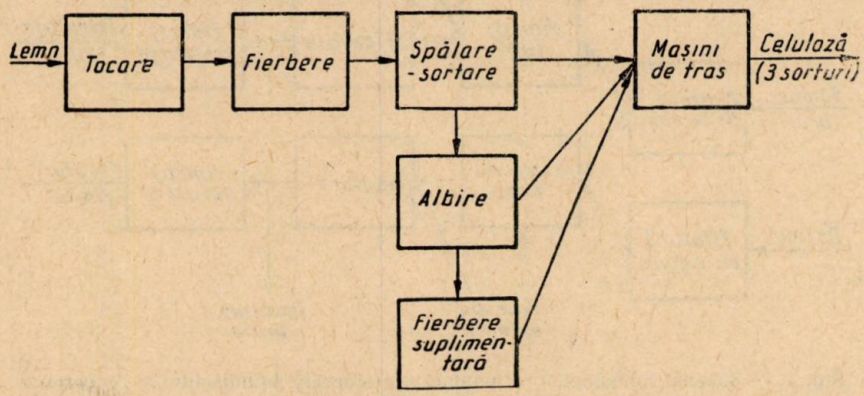


Fig. 4. — Schema tehnologică principială a fabricării celulozei.

ramificată de tipul din figura 3 *a*, ca şi în cazul proceselor cu porţiuni de tipul ramificat din figura 3 *a*, urmate numai de porţiuni de tip serie, apare necesitatea separării conturului în punctele de ramificare, în măsura în care procesul de producţie conduce la sortimente deosebite, caz în care procentul de produse realizate în fazele situate înaintea punctului de ramificaţie de tipul din figura 3 *a* intră în prelucrarea care continuă după punctul de ramificaţie cu ponderi variabile cu sortul ce se fabrică; într-adevăr, pentru determinarea consumului specific de energie pentru fiecare sort este necesară cunoaşterea consumului pe fiecare ramură pentru ca adunarea lor să se facă în raport cu ponderile menţionate.

Împărţirile arătate pînă acum ale unui contur în contururi componente mai mici sînt necesare, cum s-a mai arătat, pentru planificare şi urmărire la nivelul organelor centrale ale statului. La acest nivel, trebuind să se cuprindă consumul total, este necesar ca la împărţirea dintr-un anumit punct de vedere a unui contur să nu rămînă nici o parte a acestuia necuprinsă într-un contur parţial şi să se stabilească indicatori de consum pentru toate formele şi purtătorii de energie iar pentru evitarea dublelor înregistrări să nu existe nici o suprapunere, nici o întrepătrundere, între două contururi parţiale (determinate dintr-un anumit punct de vedere).

Pentru necesităţile de control operativ, în scopul economisirii energiei, apare în cadrul intern al întreprinderilor, necesitatea considerării şi a altor contururi parţiale (pe care le vom denumi „subcontururi") decît cele arătate mai înainte (pe care le vom denumi „contururi de bază").

Pentru a se evita erori în determinarea indicatorilor de consum specific pe aceste ultime contururi, este necesar ca un subcontur să fie cuprins în cadrul unui singur contur de bază. Avînd în vedere scopul indicatorilor pe subcontururi, nu mai este necesar ca un contur de bază să fie complet acoperit cu subcontururi și ca pentru fiecare subcontur să se stabilească și să se urmărească indicatorii de consum pentru toate formele sau purtătorii de energie, ci este suficient să se stabilească subcontururi numai pentru fiecare instalație și agregat mare consumator de o anumită formă sau purtător de energie, subcontururile putînd fi altele pentru diferitele forme sau purtători de energie.

3.3.2. Considerații specifice instalațiilor transformatoare de energie

Considerațiile făcute la punctul 3.3.1 privind stabilirea conturilor și consumurilor efective dintr-un contur se aplică tuturor proceselor consumatoare de energie, inclusiv celor de transformare a energiei dintr-o formă în alta (formă de energie considerată în sensul definit la punctul 3.2), cu observația ca produsul realizat (în scopul obținerii căruia s-a întreprins procesul) este el însuși o formă sau un purtător de energie la al cărui volum se raportează consumul din contur. Cantitățile de energie ieșite din conturul pentru care s-a realizat procesul de transformare nu sînt desigur resurse secundare și deci nu trebuie scăzute din cantitățile de energie intrate. Dacă însă din procese care au drept principal scop transformări energetice, apar pe lîngă producția de formele sau purtătorii de energie care constituie scopul procesului și anumite resurse energetice secundare care se folosesc în alte procese, energia corespunzătoare acestor resurse trebuie scăzută din energia intrată; de exemplu, în cazul unei cocserii, pentru determinarea indicatorului de consum specific de energie, din cantitatea de energie chimic legată a cărbunilor intrați în cocserie, trebuie scăzută energia chimic legată a gazului de cocs și căldura conținută de acest gaz în măsura în care aceste energii sînt folosite în afara procesului de producție a cocsului.

În afară însă de precizările de mai sus care trebuie aduse problemelor generale ale contururilor și consumurilor efective de energie pentru aplicarea lor corectă în cazul instalațiilor transformatoare de energie, trebuie menționat că pentru aceste din urmă instalații apare necesitatea luării în considerație și a unor altor contururi decît cele care sînt necesare în general, în măsura în care o parte din produsul acestor instalații (energie) este sau poate fi folosit în însăși procesul de transformare, cum este cazul centralelor electrice, al centralelor termice, al cocseriilor etc.; într-adevăr, într-o centrală electrică o parte din energia electrică produsă (măsurată la bornele generatoarelor electrice) este folosită pentru acționarea serviciilor interne ale centralei, iar într-o centrală termică o parte din aburul produs (măsurat la ventilul de ieșire din cazan) poate fi folosit pentru acționarea pompelor de alimentare sau pentru injecția combustibilului lichid; de asemenea, într-o cocserie, o parte din resursa secundară care este gazul de cocs, (măsurat la ieșirea din instalație de captare a sa) se poate folosi pentru încălzirea instalațiilor de cocsificare.

Conform prevederilor de la punctul 3.1, indicatorii de consum specific de energie corespunzători unui proces de producție și deci contururile la care ei se referă includ nu numai utilajele principale ale procesului ci și utilajele auxiliare proprii care deservesc direct utilajele principale, împreună cu consumurile sale. În această situație, la instalațiile transformatoare de energie care consumă o parte din producția lor, acest consum propriu nu este prins separat în evidență (întrucît are loc în interiorul conturului, împreună cu consumul din forma de energie care trebuie transformată) adică indicatorii de consum specific de energie se raportează la producția netă de energie (egală cu producția agregatului producător minus partea din această producție folosită în cadrul ansamblului procesului).

Întrucît în cadrul indicatorilor de consum specific de energie instalațiile transformatoare de energie au un rol special, este necesar ca pentru aceste instalații să se stabilească indicatori cît mai detaliați, între altele să se scoată în evidență și consumul lor propriu de energie. Apare deci necesitatea, din acest punct de vedere, a împărțirii conturului unui proces transformator de energie în două subcontururi : unul care să închidă numai agregatele principale ale procesului și altul care să închidă agregatele auxiliare, adică serviciile interne. Indicatorii de consum ai primului contur vor rezulta din raportarea consumului de energie netransformată la producția de energie transformată brută, măsurată imediat la ieșirea din agregatul final, iar indicatorii celui de-al doilea contur vor rezulta din raportarea consumului de energie transformată la producția brută din această formă de energie realizată în cadrul primului contur și se vor exprima în procente.

Dar în instalațiile transformatoare de energie apar uneori și forme sau purtători de energie intermediari între forma de energie inițială și cea rezultată în finalul procesului. Pentru a se putea urmări (așa cum încă de la începutul lucrării s-a arătat că este necesar) indicatorii de consum ai diverselor forme și purtători de energie, apare necesitatea împărțirii, în asemenea cazuri, a conturului de ansamblu al unei instalații de transformare a energiei în contururi parțiale corespunzătoare producerii diferitelor forme și purtători de energie (astfel cum sînt definiți la punctul 3.2). De exemplu, într-o centrală termoelectrică cu abur, conturul centralei va trebui împărțit, din acest punct de vedere, în două părți, un contur corespunzînd instalațiilor de producere a aburului, pe bază de consum de combustibil sau de căldură din gaze calde dintr-o resursă secundară, și un al doilea contur, corespunzînd instalațiilor de producere a energiei electrice în grupurile electrogene cu turbine cu abur.

3.4. MODUL DE EXPRIMARE AL MĂRIMII INDICATORILOR DE CONSUM SPECIFIC DE ENERGIE

Mărimea consumului specific de energie pentru un proces de producție într-o instalație dată depinde de o serie de elemente, dintre care cel mai important este, de obicei, productivitatea cu care lucrează insta-

lația, adică producția dată de instalație în unitatea de timp. Alte elemente care influențează în mod obiectiv mărimea consumurilor specifice de energie sînt după specificul procesului și instalației considerate : calitatea materiilor prime sau a materialelor folosite, calitatea și felul sorturilor de produse realizate, temperatura, luminozitatea și gradul de umiditate al mediului ambiant, starea instalației (gradul ei de uzură între două reparații normate) etc.

Pentru a răspunde necesităților de planificare și de control, este necesară deci cunoașterea legii de variație cel puțin a principalilor indicatori de consum specific de energie în raport, cel puțin, cu cele mai importante elemente de care depind acești indicatori și cel puțin la nivelul fiecărei întreprinderi.

Legile de variație corespunzătoare pot fi exprimate analitic sau grafic, constituind ceea ce se numește caracteristicile energetice ale procesului de producție considerat.

În general, pentru un proces dat, caracteristica energetică se dă în funcție de productivitate, iar atunci cînd consumul specific prezintă variații importante din cauza și a altor parametrii, se dă o familie de astfel de caracteristici funcție de productivitate, pentru diverse valori constante ale parametrilor care influențează cel mai mult consumul specific considerat.

Legea de variație (caracteristica energetică) cu productivitatea trebuie stabilită numai pentru zona de productivități în care lucrează în mod normal instalația considerată.

4. CONCLUZII

După cum a rezultat din prezentarea făcută, planificarea dezvoltării energetice, controlul utilizării raționale a energiei de toate formele și compararea eficienței energetice a diverselor procese de producție, necesită existența unui sistem unitar și coherent de indicatori de consum specific de energie.

Indicatorii care se folosesc astăzi nu răspund integral acestor scopuri ; ei nu constituie un sistem propriu-zis, științific, întrucît nu au la bază principii unitare, nu acoperă întregul consum și nici toate formele de energie, nu permit — în general — stabilirea consumului de energie total (din toate formele de energie) și deci nici compararea eficienței energetice a unor procese de producție cu scop analog, nu scot în evidență folosirea resurselor energetice secundare etc.

Pe baza analizării problemelor la care sînt chemați să răspundă indicatorii de consum specific de energie și a studiului tipurilor de procese consumatoare de energie din ramurile productive ale economiei naționale, au rezultat o serie de principii care trebuie să stea la baza creării unui sistem unitar, științific, de indicatori de consum specific de energie. Dintre aceste principii, se citează :

— asocierea indicatorilor de consum specific din fiecare formă sau purtător de energie la diverse contururi care închid procesele consumatoare, contururi care, plecînd de la cel mai cuprinzător — cel al economiei naţionale în ansamblu — se subdivid în contururi din ce în ce mai mici, delimitate în funcţie de nivelul la care se urmăresc indicatorii şi de caracteristicile şi scopul proceselor tehnologice consumatoare; în acest fel se acoperă cu indicatori de consum specific consumul integral de energie, se pot stabili indicatori de consum pentru ansamblul formelor de energie folosite; se ţine seama de influenţa cooperării între întreprinderi etc.;

— evidenţierea resurselor energetice secundare rezultate într-un contur şi folosite în alt contur sub formă de indicatori de consum negativi, evitîndu-se posibilitatea dublelor înregistrări de consum;

— eliminarea din sistemul de indicatori de consum specific de energie a anumitor forme sau purtători de energie care fie că au caracterul de materie primă fie că intervin în procesele consumatoare ca forme intermediare pentru care nu există posibilitatea — practică sau chiar teoretică — a măsurării şi ţinerii evidenţei de consum, rezultînd de asemenea că, în general, formele de energie trebuie urmărite prin indicatori de consum din forma de energie respectivă, cu anumite excepţii în care nu se poate urmări decît consumul de purtător de energie, cazuri în care indicatorii trebuie să se refere la acest din urmă consum.

Se poate afirma că, pornind de la aceste principii, există posibilitatea practică a creării unui sistem de indicatori de consum specific de energie aplicabil în întreprinderi, pe ramuri ale industriei şi economiei şi pe ansamblul economiei, sistem pe care l-au studiat autorii şi îşi propun să-l dezvolte într-o lucrare separată.

К ВОПРОСУ О СИСТЕМАТИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭНЕРГИИ

РЕЗЮМЕ

Излагаются принципы единой системы показателей удельного расхода энергии и нормирования потребления энергии в производственных отраслях.

Указывается необходимость систематизации этих показателей на основе единого научного метода, применимого во всех отраслях народного хозяйства, учитывающего все проявляющиеся в производственных процессах формы энергии, применимого на всех уровнях организации производства, не приводящего к двойным записям, отличающегося достаточно аналитическим характером для получения возможности сравнения с показателями, основанными на других рациональных системах, позволяющего определение общего расхода энергии всех видов.

Указанная система удовлетворяет требованиям планирования контроля и сопоставления различных решений при использовании энергии в национальном масштабе.

CONSIDERAȚII ASUPRA CARACTERULUI CORELAȚIILOR CONSUMULUI DE ENERGIE ÎN INDUSTRIE

DE

CS. NAGY și S. MANEA

620.93.004.15 : 66/69

Necesitatea și utilizarea unor prognoze ale necesarului de energie electrică pentru acțiunea de planificare a economiei naționale a devenit astăzi un fapt incontestabil.

Dintre metodele utilizate pentru predeterminarea necesarului de energie electrică, metoda analitică bazată pe dinamica consumurilor specifice de energie dă rezultate mai concludente pentru țările cu economie socialistă, întrucît dă posibilitatea unei analize concrete și multilaterale a fenomenului studiat. Această metodă are însă unele deficiențe deoarece necesită multe date, reclamă un volum mare de muncă și nu poate fi folosită pentru o perspectivă lungă [1]. Tocmai de aceea, metodele globale care sînt mult mai expeditive se folosesc și se vor folosi și în viitor, pentru prognoze pe termen lung și foarte lung [2], chiar dacă dau mai puține informații asupra defalcării consumului de energie.

Metodele globale pentru prognoza consumului de energie se împart în două categorii principale :

— metoda seriilor de timp, la care necesarul de energie pentru viitor se determină prin extrapolarea consumului sau producției de energie electrică într-o perioadă cunoscută ;

— metoda stabilirii necesarului de energie electrică pe baza unor corelații între producția sau consumul de energie electrică și unii indic economici sintetici (indicele producției industriale, indicele productivității muncii, venitul național etc.). Această metodă pentru condițiile economiei

socialiste planificate este mai adecvată întrucît indicii economici sintetici pentru perioada viitoare pot fi cunoscuţi cu suficientă precizie.

În această lucrare, se vor studia unele corelaţii cu un domeniu de aplicabilitate mai restrîns şi anume corelaţia dintre consumul de energie electrică din industrie şi indicele producţiei industriale şi între înzestrarea cu energie electrică a muncii şi productivitatea muncii în scopul de a trage concluzii cu privire la caracterul acestor corelaţii în perioada trecută şi în ce măsură pot fi extrapolate pentru viitor.

1. CARACTERUL CORELAŢIEI DINTRE CONSUMUL DE ENERGIE ELECTRICĂ DIN INDUSTRIE ŞI INDICELE PRODUCŢIEI INDUSTRIALE

În studiul corelaţiilor, una din problemele cele mai dificile este stabilirea caracterului corelaţiei mărimilor studiate şi anume dacă este liniară sau neliniară şi în ultimul caz prin ce funcţie poate fi cel mai bine aproximată legătura respectivă.

Pentru a ne putea forma o părere asupra caracterului corelaţiei studiate, s-a cercetat, pentru o perioadă trecută (1950—1961), pentru 20 de ţări cu diferite nivele şi structuri industriale şi chiar cu diferite sisteme economice, evoluţia consumului de energie electrică din industrie în funcţie de indicele producţiei industriale (fig.1) şi a rezultat că pentru majoritatea ţărilor această evoluţie poate fi foarte bine aproximată cu o dreaptă

$$E_i = C_0 + C_1 I, \tag{1}$$

unde

E_i — consumul de energie electrică din industrie;

I — indicele producţiei industriale;

C_0, C_1 — constante.

Din datele statistice pentru perioada 1950—1961 s-au calculat constantele ecuaţiei (1) cu ajutorul metodei minimelor sumei pătratelor abaterilor iar rezultatele, în ordinea mărimii pantei, sînt trecute în tabela 1.

Pentru a vedea eroarea cu care dreapta aproximează punctele reale s-a trecut în tabela 1 abaterea standard calculată cu formula

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{A}{n}}}{\bar{E}_i} 100, \tag{2}$$

unde

C_v — abaterea standard în procente,

A — suma patratelor abaterilor punctelor reale faţă de dreaptă,

n — numărul de puncte considerat,

$\bar{E}_i$ — media consumului de energie electrică din industrie pe perioada de calcul.

În tabela 1 sînt trecute de asemenea valorile coeficienților de corelație (r) calculați cu formula

$$r = \frac{\sum (E_i - \bar{E}_i)(I - \bar{I})}{\sqrt{\sum (E_i - \bar{E}_i)^2 \sum (I - \bar{I})^2}}, \qquad (3)$$

unde $\bar{I}$ este media indicelui producției industriale din perioada de calcul.

Tabela 1

Corelația dintre consumul de energie electrică din industrie și indicele producției industriale

Nr. crt.	Țara	Perioada considerată	Funcția E_i și I=100 pt. 1950	Coeficient de corelație	Abaterea standard %
1	R.S.C.	1950—1961	$E_i = 26{,}3 + 0{,}75\ I$	0,995	2,7
2	Italia	1950—1961	$E_i = 20{,}1 + 0{,}87\ I$	0,996	2,1
3	R.P.P.	1950—1961	$E_i = 2{,}2 + 0{,}89\ I$	0,998	2,1
4	R.D.G.	1950—1961	$E_i = -11{,}9 + 0{,}93\ I$	0,983	6,4
5	Franța	1950—1961	$E_i = 0{,}7 + 1{,}04\ I$	0,993	2,8
6	R.F.G.	1950—1961	$E_i = -7{,}1 + 1{,}05\ I$	0,999	1,0
7	R.P.U.	1950—1961	$E_i = 6{,}5 + 1{,}05\ I$	0,990	4,2
8	U.R.S.S.	1950—1961	$E_i = -6{,}5 + 1{,}05\ I$	0,996	1,0
9	R.P.R.	1950—1961	$E_i = -12{,}5 + 1{,}08\ I$	0,999	1,7
10	Austria	1950—1961	$E_i = -2{,}5 + 1{,}12\ I$	0,990	3,4
11	Norvegia	1950—1961	$E_i = -37{,}4 + 1{,}27\ I$	0,991	4,3
12	R.P.B.	1950—1959	$E_i = -40{,}0 + 1{,}40\ I$	0,999	2,2
13	Danemarca*)	1951—1961	$E_i = -41{,}2 + 1{,}48\ I$	0,990	3,0
14	R.S.F. Iugoslavia	1950—1961	$E_i = -37{,}9 + 1{,}48\ I$	0,998	3,2
15	Olanda	1950—1961	$E_i = -47{,}2 + 1{,}52\ I$	0,992	2,9
16	Belgia	1950—1961	$E_i = -67{,}4 + 1{,}64\ I$	0,958	4,3
17	Finlanda	1950—1961	$E_i = -82{,}5 + 1{,}71\ I$	0,987	4,9
18	Suedia*)	1951—1961	$E_i = -88{,}8 + 1{,}99\ I$	0,983	3,3
19	Anglia*)	1951—1961	$E_i = -120{,}5 + 2{,}20\ I$	0,973	4,3
20	S.U.A.*)	1951—1961	$E_i = -217{,}4 + 3{,}21\ I$	0,937	8,0

*) E_i și I = 100 pentru anul 1951.

Iată cîteva constatări care se impun de la sine la studierea materialului faptic :

— o valoare ridicată a coeficientului de corelație ; pentru 17 țări se încadrează în limita 0,980—0,999 ;

— o alură liniară a evoluției consumului de energie electrică din industrie în funcție de indicele producției industriale, pentru majoritatea țărilor ;

— valori relativ mici pentru abaterea standard ; în cele mai multe cazuri sub 5% ;

— o limită destul de strînsă a variației valorii pantei ; pentru 10 țări panta dreptei este între 1,0 și 1,5 ;

— țara noastră se încadrează între țările cu coeficient ridicat de corelație, cu abatere standard redusă și în domeniul cu frecvență maximă a valorii pantei.

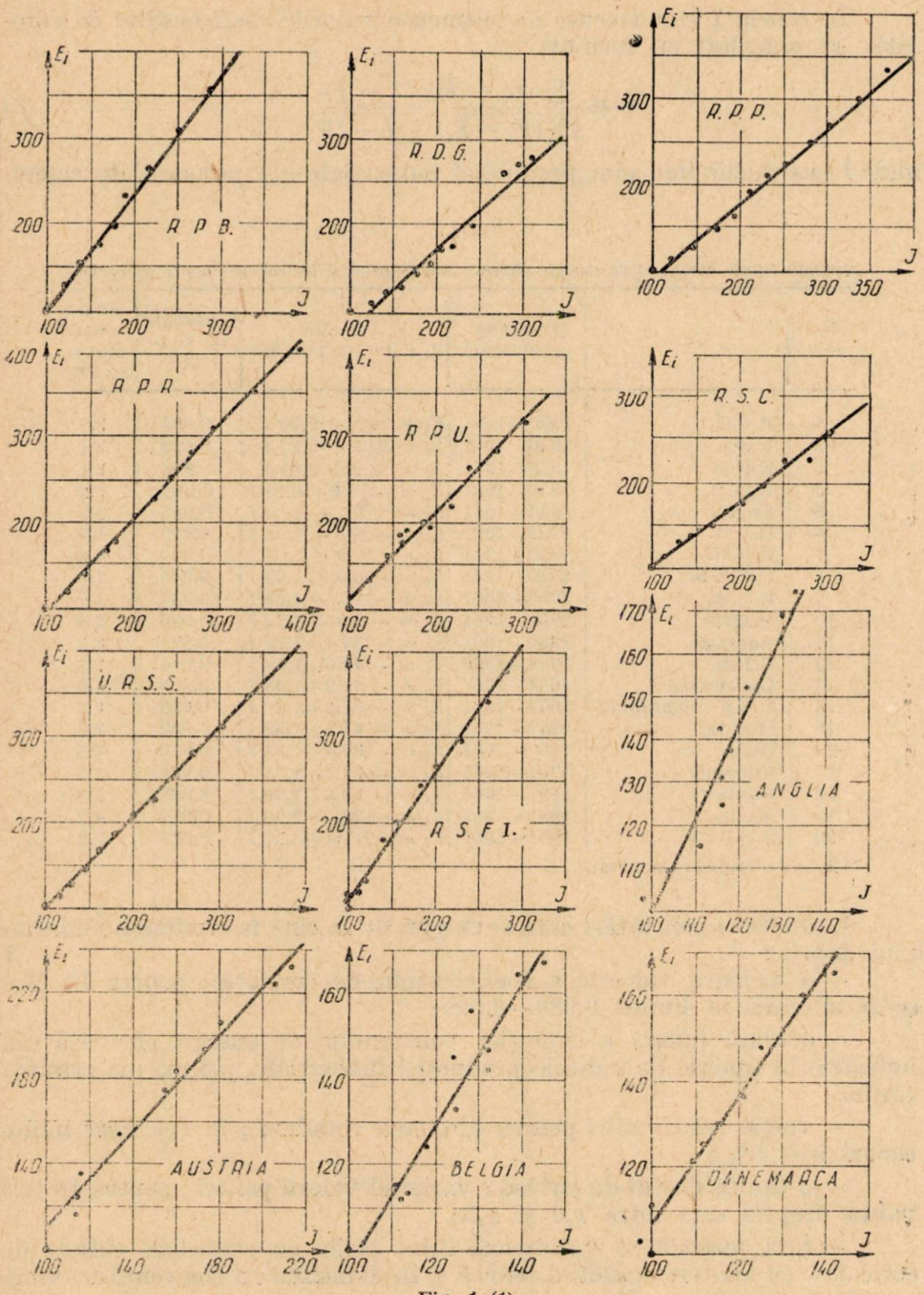

Ei
J
R P B.
R. D. G.
R. P. P.
R P R
R P U.
R. S. C.
U. R. S. S.
R. S. F I.
ANGLIA
AUSTRIA
BELGIA
DANEMARCA

Fig. 1 (1)

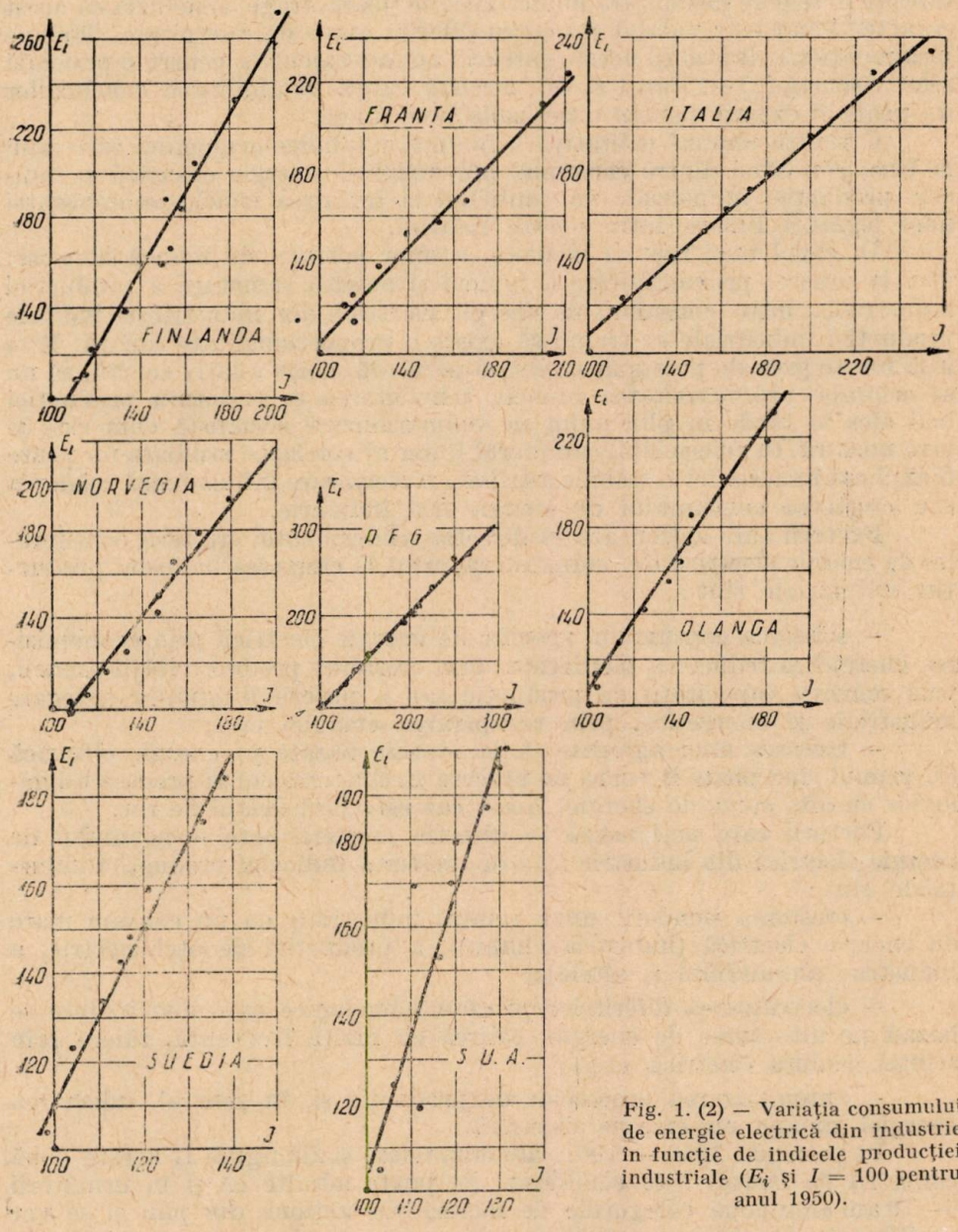


Fig. 1. (2) — Variația consumului de energie electrică din industrie în funcție de indicele producției industriale (E_i și $I = 100$ pentru anul 1950).

Din faptul că între consumul de energie electrică din industrie și indicele producției industriale există o corelație liniară strînsă pentru țări cu diferite nivele de dezvoltare industrială, se poate trage concluzia că acest caracter liniar este valabil și pentru diferite etape de dezvoltare. Trebuie însă menționat faptul că aceste corelații au fost calculate pentru o perioadă relativ scurtă (11—12 ani) și din această cauză valabilitatea concluziilor nu poate fi extinsă pentru o perioadă prea lungă.

O scurtă analiză calitativă a factorilor tehnico-economici care stau la baza corelației dintre consumul industrial de energie electrică și indicele producției industriale va contribui la întărirea concluziei existenței unei legături liniare între aceste mărimi.

În cazul unei tehnici identice, a unor condiții de muncă identice, deci la aceeași productivitate a muncii și aceeași structură a producției industriale, între consumul de energie electrică din industrie și indicele producției industriale ar trebui să existe o proporționalitate liniară. Este însă foarte greu de presupus ca într-o perioadă, chiar relativ scurtă, să nu se schimbe productivitatea muncii, tehnicitatea și structura producției mai ales în țările în plin avînt de industrializare socialistă cum este și țara noastră. În consecință, caracterul liniar al corelației studiate nu poate fi explicat în acest fel și trebuie analizați factorii care influențează scăderea sau creșterea consumului de energie din industrie.

Factorii care acționează în direcția scăderii cotei creșterii consumului de energie electrică din industrie raportat la creșterea indicelui producției industriale sînt :

— scăderea consumului specific de energie electrică prin economisirea energiei și reducerea pierderilor, prin creșterea productivității muncii, prin mărirea capacității de producție sau a puterii diferitelor agregate industriale și energetice, prin recuperarea energiei etc. ;

— trecerea unor agregate de la procese bazate pe energie electrică (în primul rînd poate fi vorba de procese electrotermice) la procese tehnologice cu alte surse de energie. Acest caz este însă destul de rar.

Factorii care acționează în direcția creșterii cotei consumului de energie electrică din industrie față de creșterea indicelui producției industriale sînt :

— creșterea ponderii unor ramuri industriale cu un consum mare de energie electrică (industria chimică, a producției de oțel electric, a industriei aluminiului și altele) ;

— electrificarea diferitelor procese tehnologice care mai înainte se bazau pe alte surse de energie (călirea cu înaltă frecvență, tăiere prin scîntei, sudura electrică etc.) ;

— automatizarea proceselor de producție și, în general, înlocuirea energiei umane cu energie electrică.

În perioada 1950 — 1961, așa cum reiese și din figura 1, aceste două categorii de factori s-au echilibrat. Se poate admite că și în următorii 5—10 ani amîndouă categoriile de factori vor acționa din plin și se vor echilibra în continuare avînd în vedere scăderea importantă planificată (11%) a consumurilor specifice de energie electrică pentru perioada

1959—1965, acțiune ce se va menține și în continuare, paralel cu creșterea ponderii industriei chimice și a aluminiului și cu electrificarea și automatizarea proceselor de producție. Gradul mai avansat de prelucrare este legat de o sporire a consumului de energie electrică, dar în același timp și de o creștere a valorii producției industriale și de aceea efectul energetic se poate greu aprecia.

Pe baza materialului faptic cît și pe baza analizei economice, ipoteza unei corelații liniare între consumul de energie electrică din industrie și indicele producției industriale pentru R.P.R. pentru o prognoză de 5—10 ani pare să fie admisibilă.

Cunoscînd din Directivele Congresului al III-lea al P.M.R. valoarea indicelui producției industriale pentru 1965, rezultă că în acest an consumul de energie electrică din industrie calculat cu relația nr. 9 din tabela 1, va fi de aproximativ $8\ 750.10^6$ kWh. Se consideră că restul consumului, adică consumul de energie electrică pentru agricultură, transport, nevoi casnice etc. crește mai repede decît indicele producției industriale și va ajunge în 1965 la aproximativ $4\ 800.10^6$ kWh*). Admițînd o ușoară scădere a procentului consumului propriu tehnologic al centralelor electrice și pierderilor în rețele (16%) și un export de $2\ 000.10^6$ kWh prin însumare, rezultă pentru anul 1965 o producție de energie electrică de aproximativ $18\ 400.10^6$ kWh.

2. CARACTERUL CORELAȚIEI DINTRE CONSUMUL DE ENERGIE ELECTRICĂ PE CAP DE MUNCITOR DIN INDUSTRIE ÎN FUNCȚIE DE PRODUCTIVITATEA MUNCII

Din cele constatate anterior cu privire la caracterul corelației dintre consumul de energie electrică din industrie și indicele producției industriale se pot trage unele concluzii referitoare la caracterul corelației dintre înzestrarea cu energie electrică a muncii și productivitatea muncii și anume

$$E_i = f(I) = C_0 + C_1 I \tag{4}$$

și de asemenea

$$M = \varphi(I), \tag{5}$$

unde M este numărul de muncitori din industrie; prin împărțirea funcției (4) cu (5) obținem

$$\frac{E_i}{M} = \frac{C_0 + C_1 I}{\varphi(I)} = e_i \tag{6}$$

unde e_i este consumul de energie electrică pe cap de muncitor din industrie.

*) Ecuația neliniară pentru evoluția consumului neindustrial de energie electrică în funcție de indicele producției industriale este dată în lucrarea: C. Nagy, S. Manea: *Despre caracterul corelațiilor dintre consumul de energie electrică și unii indici economici sintetici*, Institutul de energetică, 1961.

Productivitarea muncii (P) se obține din raportul

$$\frac{I}{M} = \frac{I}{\varphi(I)} = P. \tag{7}$$

Din formulele (4), (5), (6), (7) se poate deduce

$$\frac{de_i}{dP} = C_1 - C_0 A, \tag{8}$$

unde A depinde de caracterul funcției $M = \varphi(I)$.

Din formula (8) rezultă că în cazul cînd $C_0 = 0$, independent de caracterul funcției, panta funcției $e_i = f(P)$ este constantă adică este o funcție liniară.

În cazul că

$$M = m_0 + m_1 I \text{ (o funcție liniară)}, \tag{9}$$

$$\frac{de_i}{dP} = C_1 - C_0 \frac{m_1}{m_0}, \tag{10}$$

de unde rezultă că $e_i = f(P)$ este liniară.

Se poate arăta că și în cazul cînd $M = \varphi(I)$ este o funcție neliniară, pentru valori mai mari ale lui I, termenul A se apropie destul de repede de zero, în consecință pentru perioada de perspectivă tratarea funcției $e_i = f(P)$ ca liniară nu este departe de realitate. Așa, de exemplu, pentru R.P.R., $\frac{de_i}{dP}$ variază, între anii 1955—1975, între 14,67 și 14,25.

Pe baza acestor considerente și a analizării figurii 2, care dă variația consumului de energie electrică pe cap de muncitor din industrie în funcție de productivitatea muncii, s-a admis că corelația între aceste mărimi are un caracter liniar.

Calculele s-au efectuat pentru 5 țări socialiste și o țară capitalistă. Rezultatele sînt redate în tabela 2.

Din tabela 2 se observă că coeficientul de corelație calculat cu formula (3) este apropiat de 1, iar abaterea standard calculată cu formula (2) este și ea foarte mică, ceea ce ajută la argumentarea faptului că $e_i = f(P)$ poate fi aproximată destul de bine cu o dreaptă.

Din cele expuse mai sus se poate trage concluzia că între înzestrarea electrică a muncii și productivitatea muncii există o legătură strînsă liniară și deci în creșterea productivității muncii electrificarea joacă un rol important fiind una din condițiile principale de ridicare a ei.

Pe baza corelației nr. 3 din tabela 2 și a productivității muncii prevăzută pentru 1965, se ajunge la aproximativ 6 500 kWh pe cap de muncitor industrial pentru acest an.

Din cele de mai sus se desprinde concluzia că atît între consumul de energie electrică din industrie și indicele producției industriale, cît și între consumul de energie electrică pe cap de muncitor din industrie și productivitatea muncii există o corelație strînsă.

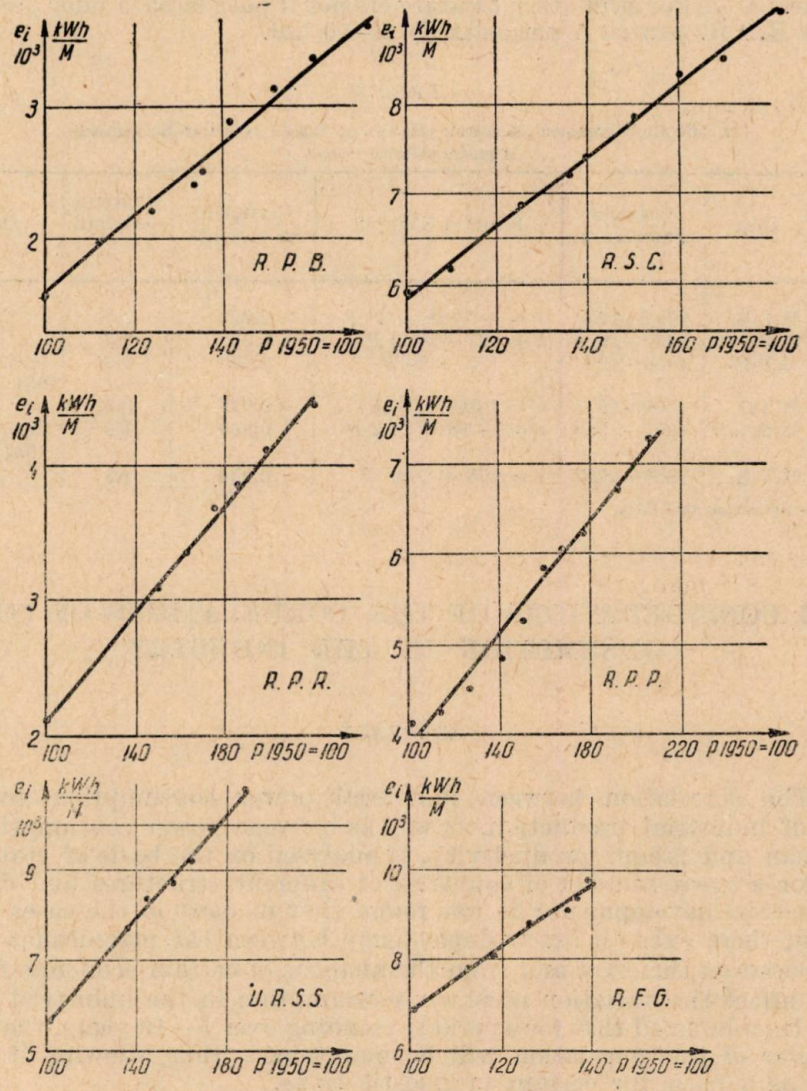


Fig. 2. — Variația consumului de energie electrică pe cap de muncitor, în funcție de productivitatea muncii.

Se constată pe baza materialului faptic și pe baza unei analize calitative a unor factori economici că pentru perioada trecută (1950—1961) corelațiile între consumul industrial de energie electrică și indicele producției industriale și între înzestrarea cu energie electrică a muncii și produc-

tivitatea muncii au un caracter liniar atît pentru ţara noastră cît şi pentru majoritatea ţărilor studiate şi ca atare ele pot fi puse la baza unor prognoze pentru R.P.R. pentru o perioadă de 5—10 ani.

Tabela 2

Corelaţia dintre consumul de energie electrică pe cap de muncitor din industrie şi productivitatea muncii

Nr. crt.	Ţara	Perioada considerată	Funcţia kWh/M	Coeficient de corelaţie	Abaterea standard %	Obs.
1	R.P.B.	1950—1959	$e = -1168 + 28\ P$	0,993	2,8	
2	R.P.P.	1950—1959	$e = 687 + 31{,}5\ P$	0,989	2,8	
3	R.P.R.	1950—1960	$e = 115 + 20\ P$	0,999	0,9	fără anii 1951 — 1954
4	R.S.C.	1950—1958	$e = 1\,556 + 37{,}64\ P$	0,999	0,6	
5	U.R.S.S.	1950—1959	$e = -18 + 57{,}2\ P$	0,997	1,6	fără anii 1951—1953
6	R.F.G.	1950—1957	$e = 176 + 67{,}6\ P$	0,994	1,2	

$P = 100$ pentru anul 1950.

SOME CONSIDERATIONS OF THE CORRELATIONS OF POWER CONSUMPTION IN THE INDUSTRY

ABSTRACT

The correlation between industrial power consumption and the index of industrial production, as well as between power consumption per workman and labour productivity, is analysed on the basis of statistical data for a great number of countries of different structures and degrees of industrial development; it was found that in most of the cases investigated, there exists a linear dependency between the magnitudes involved. Based on that fact and from the analysis of certain economic factors which affect the variation of power consumption in the industrial sector it has been inferred that for a period extending over 5—10 years, the linear character of the correlation will be maintained, thus allowing it to be taken as a basis for certain prognostications.

BIBLIOGRAFIE

1. A. DUMITRESCU, M. ELEFTERESCU, S. KOVÁCS, *Contribuţii la stabilirea dinamicii consumurilor energetice*. St. cerc. energ., **VIII**, *2* (1958).
2. M. PETCU, C. NAGY, S. MANEA, *Prognoza necesarului de putere şi energie electrică*. St. cerc. energ., Seria A, **XII**, *3* (1962).
3. * * * *Anuarul statistic al R.P.R.*, 1962.

4. * * * *Bulletin annuel de statistiques de l'énergie électrique pour l'Europe, 1956—1961.* Nations Unies.
5. * * * *Annuaire statistique 1955—1961.* Nations Unies.
6. * * * Revista de statistică, **IX**, *3*, 67—68 (1960).
7. * * * Вестник статистики, *4*, 80 (1960).
8. * * * Вестник статистики, *9*, 90—93 (1960).
9. * * * *Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland.* Stuttgart (1958).
10. * * * Rocznik Statystyczny, *114, 116*, Varşovia (1960).
11. * * * Статистики Годисник на Народна Република България 1960, 69, 91, 113, 118, Sofia (1690).
12. Димитър А. Георгиев, Борис Ст. Костов, *Общ. енергиен баланс на България 1939—1952.* Издание на Българската Академия на Науките, София, 1958.
13. * * * Statistická Rocénka Republiky Cehskoslovenske, 92 (1959).
14. * * * *Directivele Congresului al III-lea al P.M.R. pentru planul de dezvoltare a economiei naționale pe anii 1960—1965 şi pentru programul economic de perspectivă.* Edit. politică, Bucureşti, 1960.

INCIDENŢA CONTINUITĂŢII SERVICIULUI ŞI MENŢINERII PARAMETRILOR ENERGIEI ELECTRICE, ÎN PROBLEMA DIMENSIONĂRII REZERVEI DE PUTERE

DE

ECATERINA ARIE, CONSTANTIN GUŢU şi MIHAI PETCU

538.542 : 621.315.513

1. INTRODUCERE

Dimensionarea economică a rezervei de putere este o problemă viu dezbătută în literatura de specialitate. Progresul realizat prin utilizarea calculului probabilităților se limitează totuşi la alegerea — mai mult sau mai puțin arbitrară — a unei norme pentru deficitul probabil de putere sau de energie [1], [2]. Pasul următor care conduce la determinarea rezervei optime nu este posibil fără a compara efectul pozitiv (economia de investiții) cu efectele negative ale reducerii rezervei de putere instalată.

Scopul articolului este de a analiza termenul al doilea al comparației, examinînd funcționarea sistemului energetic cu deficit de putere şi consecințele unei asemenea funcționări asupra consumatorilor şi asupra sistemului însuşi. Din analiza întreprinsă au rezultat considerațiile în legătură cu dimensionarea rezervei şi cu modul optim de exploatare a unui sistem cu deficit de putere.

2. FUNCŢIONAREA SISTEMULUI ELECTROENERGETIC CU DEFICIT DE PUTERE

La apariția unui deficit de putere datorită fie creşterii rapide a sarcinii, fie deconectării intempestive a unei puteri generatoare, în sistem se produce o modificare a parametrilor de lucru, care depinde de mărimea

deficitului, de regimul de funcționare și de configurația rețelei. Dacă sistemul dispune de rezervă de putere activă și reactivă în funcțiune, durata abaterii frecvenței de la valoarea normală depinde de viteza de variație a sarcinii și de viteza de reglaj — manual sau automat — a frecvenței și puterii. Pînă la limitarea variațiilor de frecvență prin acțiunea reglajului secundar, apare un spor de producție în centrale (datorit reglajului primar și efectului de autoreglaj al turbinelor) de circa 15—20% pentru o scădere a frecvenței de 1 %. Întrucît repartizarea acestui spor de producție între centrale are loc după statismul natural al grupurilor și nu după considerente tehnice sau de eficacitate optimă, normele de exploatare ale sistemelor prevăd limitarea acestor abateri ale frecvenței la 0,1 — 0,2 Hz [3], [6]. Limitele de mai sus, valabile în cazul existenței rezervei de putere în sistem, interesează la proiectarea reglajului secundar al frecvenței sau la automatizarea repartiției economice a sarcinii suplimentare.

Situația este însă diferită în cazul lipsei rezervei de putere activă. În acest caz, numai o mică parte din sarcina suplimentară poate fi preluată (în anumite condiții) de grupurile din centrale, prin supraîncărcare, datorită autoreglajului turbinelor. Dezechilibrul dintre puterea cerută și cea disponibilă produce în aceste condiții scăderi importante ale frecvenței și tensiunii. Valorile abaterilor depind de rezerva (locală și în centrale) de putere reactivă precum și de caracteristicile sarcinii. Pentru

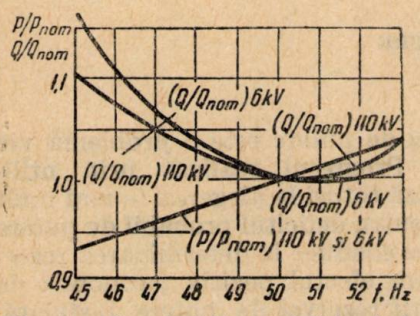


Fig. 1. — Caracteristica variației puterilor activă și reactivă a sarcinii în funcție de frecvență [3].

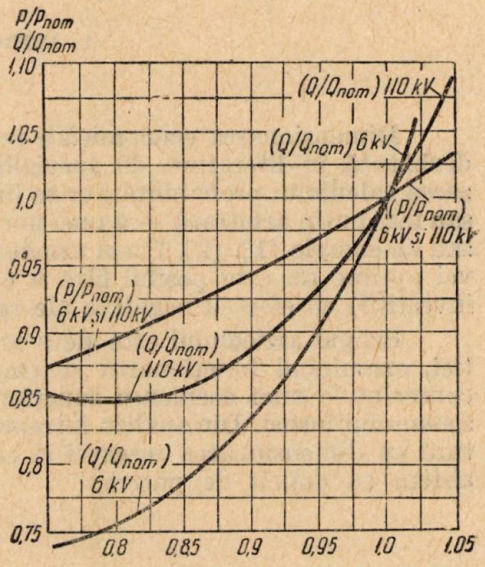


Fig. 2. — Caracteristica de variație a puterilor activă și reactivă a sarcinii în funcție de tensiune [3]. →

caracteristicile sarcinii se dau în literatură diferite indicații, valabile pentru variații relativ rapide ale parametrilor de regim și aplicabile în studii de stabilitate sau de reglaj al tensiunii sau frecvenței; asemenea curbe au fost reproduse în figurile 1 și 2.

Ele nu sînt însă aplicabile în studiul abaterilor tensiunii și frecvenței ce apar la deficite de putere de lungă durată. În aceste cazuri se vor aplatisa în special caracteristicile puterii active, datorită efectului reglajului vitezei la motoarele reglabile, a reglării temperaturii la cuptoare și sudură, a măririi numărului becurilor etc. În schimb, la depășirea limitei corespunzătoare domeniului de reglaj, panta caracteristicilor de putere activă va crește repede atît datorită dispariției acțiunii acestor reglaje, cît și ca urmare a deconectării intempestive sau controlate a receptorilor a căror funcționare la parametri prea scăzuți nu este posibilă. Din această cauză caracteristicile reale ale sarcinii nu pot fi determinate prin calcul ci numai experimental.

Dacă se cunosc, pentru centralele ce alimentează o rețea, caracteristicile $P_G(f)$ și $Q_G(P, U_G)$ ale puterilor active și reactive generate, iar pentru principalii consumatori caracteristicile $P_s(f, U_s)$ și $Q_s(f, U_s)$ [3], atunci se pot determina valorile parametrilor de regim prin rezolvarea sistemului de ecuații neliniare ce descrie echilibrul puterilor (respectiv al curenților) în diferitele noduri, ținînd seama de pierderile de putere și tensiune în rețea.

Folosind ecuații liniarizate și scheme simplificate se pot determina, direct, diferiți indici statistici care sub denumirea de indici integrali de calitate, se introduc din ce în ce mai mult la compararea variantelor de proiectare sau exploatare a sistemelor electroenergetice din punctul de vedere al eficacității reglajului frecvenței și tensiunii [8], [9], [10], [11], [12], [13]. Dintre indicii integrali de calitate propuși amintim:

— abaterea tip a frecvenței [9]

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left(f - \bar{f}\right)^2 \, dt},$$

unde:

$$\bar{f} = \frac{1}{T}\int_0^T f \, dt \; ;$$

— iregularitatea tensiunii [8], [11], [12], sau criteriul Ailleret:

$$I_T = \frac{10\,000}{T} \sum_1^n \int_0^T P(t)\,(u^* - 1)^2 \, dt$$

(suma se extinde la totalitatea nodurilor unei rețele; s-a notat cu u^* valoarea relativă a tensiunii raportată la tensiunea nominală);

— probabilitatea de depășire a valorilor maxime și minime ale tensiunii admisibile în regim normal [13].

În anexa 1 sînt studiate pentru ilustrare trei cazuri tipice de funcționare a sistemului cu deficit de putere. Deficitul de putere activă conduce întotdeauna la variații de frecvență mult mai mari decît cele ce apar datorită oscilațiilor uzuale ale sarcinii sau a dificultăților de urmărire instantanee a curbei de sarcină. Astfel, la tensiunea normală, unui deficit de putere de 5% îi corespunde o variație de frecvență de 3—9% față de

circa 0,3% cît este variația de frecvență ce apare la un dezechilibru de 5% din putere, în condițiile existenței unei rezerve de reglaj.

În rețelele în care lipsa rezervei de putere reactivă și capacitatea redusă de transport a rețelei determină, chiar în regim normal, valori scăzute ale tensiunii în anumite noduri, scăderea frecvenței este mai mică decît la tensiune constantă (la același deficit de putere activă), dar ea este însoțită de o scădere suplimentară importantă a tensiunii. În asemenea rețele, dacă există centrale conectate în noduri în care tensiunea scade mult, o parte din rezerva de putere activă nu este utilizabilă din cauză că se ajunge repede la valoarea limită a curentului statoric al generatoarelor sau la încărcarea limită a transformatoarelor, astfel încît deficitul de putere apare mai devreme decît la tensiuni normale.

Pe de altă parte, dacă gama de reglaj a transformatoarelor ce alimentează rețeaua de distribuție este insuficientă pentru asigurarea independenței rețelei de distribuție de rețeaua de interconexiune [24] sau dacă se depășește o anumită valoare critică a tensiunii pînă la care transformatoarele reglabile sînt eficace, căderile de tensiune din rețeaua de interconexiune se reflectă și asupra consumatorilor.

3. EFECTELE VARIAȚIILOR DE FRECVENȚĂ ȘI TENSIUNE ASUPRA CONSUMATORILOR

În literatura mondială, există foarte puține date cantitative asupra daunelor produse de variațiile de frecvență și tensiune asupra consumatorilor. În anexa 2 sînt redate principalele efecte ce apar la receptoarele folosite în mod curent.

Se observă că productivitatea multor consumatori este afectată datorită scăderii vitezei de rotație și a puterii motoarelor. În numeroase alte cazuri se constată scăderea calității produsului : micșorarea vitezei de rotație, a debitului de materiale, a fluxului de aer sau gaze, scăderea presiunii pot provoca modificări ale rezistenței și elasticității firelor, pot conduce la abateri importante ale temperaturii de la cea optimă, la modificări ale proporțiilor materialelor ce reacționează chimic etc.

La scăderi importante ale tensiunii, pe lîngă alte efecte se constată deconectări foarte frecvente datorită suprasarcinilor întîmplătoare ; asemenea deconectări provoacă întreruperi ale proceselor de producție. Uzura motoarelor crește*), efectul acesteia putînd să apară mult mai tîrziu, cînd stabilirea cauzei este dificilă. Motoarele supradimensionate, utilizate frecvent, suferă într-o măsură mai mică. Însă pentru aprecierea uzurii lor nu se poate folosi factorul de cerere global și nici chiar curentul echivalent, deoarece uzura crește mult mai repede în regim variabil. Astfel, în cazul motorului unei morteze funcționînd în regim intermitent la o încărcare echivalentă de 87% din puterea nominală, s-a constatat*) o uzură de 1,04 la $0{,}9\,U_N$ și de 32 la $0{,}8\ U_N$ (raportate la uzura corespunzătoare funcționării permanente la putere și tensiune nominală) pe cînd calcu-

*) E. Arie, S. Ionescu, P. Nicolae, Th. Miclescu, Șt. Kovács, *Influența variațiilor de tensiune asupra productivității în uzinele „23 August" și „Republica"*. Acad. R.P.R., Institutul de energetică, București, 1957.

lînd cu curentul echivalent s-ar fi obținut o uzură de 0,8 la tensiunea 0,9 U_N și 1,2 la 0,8 U_N.

Deteriorarea motoarelor la funcționarea îndelungată cu tensiune scăzută este favorizată și de faptul că numeroase întreprinderi recurg la rebobinarea releelor de protecție modificînd sensibilitatea acestora. Atît deconectările datorită suprasarcinilor întîmplătoare, cît și deteriorările de motoare sînt mai frecvente la întreprinderile moderne, cu un grad de automatizare avansat, unde o dată cu specializarea motoarelor pe operații, dimensionarea este mai strînsă.

Numeroase dificultăți și chiar accidente pot apare acolo unde se folosesc mecanisme acționate prin electromagneți și în procesele în care iluminatul are un rol important în productivitatea și calitatea muncii sau în tehnica securității.

Așadar, în întreprinderile consumatoare, funcționarea la frecvență scăzută și mai ales la tensiune scăzută este însoțită de întreruperi ale producției : unele scurte, din cauza deconectării motoarelor la supra sarcină accidentală sau la funcționarea greșită a releelor de protecție, altele mai îndelungate din cauza defectării unor motoare sau pentru că este imposibilă realizarea condițiilor tehnice impuse de procesul tehnologic. Pe de altă parte, supraîncărcarea centralelor și a rețelei de transport, reflectată prin scăderea parametrilor de calitate a energiei electrice, mărește probabilitatea avariilor în sistem urmate de întreruperea unor porțiuni din rețea sau de sacrificarea forțată și rapidă (prin relee de minim de frecvență) a unor sectoare ale rețelei electrice, pentru a evita prăbușirea completă a sistemului.

Toate aceste întreruperi forțate se soldează cu daune materiale. În tabela dată în anexa 3 se indică, pentru exemplificare, efectele principale ale întreruperilor pentru cîteva procese tehnologice tipice. Totodată se indică și valoarea daunelor specifice (raportate la kWh și la minutul de întrerupere) în funcție de durata întreruperii. Se constată că daunele diferă mult de la un proces la altul (3 lei/kWh la fabricarea firelor de mătase viscoză și 600 lei/kWh la rafinarea țițeiului), pentru unele procese atingînd valori foarte mari datorită unor catastrofe.

În paragraful precedent s-a arătat că la o anumită putere disponibilă în centrale, puterea furnizată consumatorilor depinde de raportul între puterea disponibilă și cea cerută de consumatori ; dacă puterea cerută este superioară celei disponibile atunci puterea furnizată — la tensiune și frecvență scăzută — este cel mult egală cu puterea ce ar fi furnizată, la parametri normali, prin reducerea forțată a puterii cerute pînă la nivelul puterii disponibile date a sistemului. Totodată în perioadele în care sistemul funcționează cu tensiune și frecvență scăzute, crește mult probabilitatea ca energia furnizată să scadă. Presupunînd că energia furnizată rămîne totuși aceeași, producția realizată de consumatori va fi mai mică deoarece la majoritatea proceselor tehnologice consumul specific de energie electrică crește atunci cînd frecvența și tensiunea scad.

În afară de aceasta, prin menținerea cererii la un nivel mai ridicat decît cel ce poate fi acoperit, respectiv prin menținerea frecvenței și tensiunii scăzute se generează o serie de daune ce nu pot fi constatate direct,

sau efecte negative care se manifestă mai tîrziu, în anumite procese vitale. Totodată funcționarea în asemenea condiții anormale poate avea consecințe sociale și poate conduce la accidente.

4. EFECTELE FUNCȚIONĂRII LA PARAMETRI DIFERIȚI DE CEI NOMINALI ASUPRA SISTEMULUI

Dintre efectele funcționării la frecvență scăzută asupra sistemului, cel mai periculos este acela al apariției vibrațiilor, ca urmare a apropierii unor grupuri generatoare de turația critică ; aceasta poate conduce la deteriorarea turbinei respective, producînd astfel pe lîngă daunele mari legate de cheltuielile de reparație și o accentuare a deficitului de putere. Chiar dacă distrugerea nu apare în timpul funcționării la frecvență scăzută, vibrațiile conduc la scurtarea duratei de viață a turbinei, efect ce apare mai tîrziu, fără să i se poată stabili cauza reală.

Dacă într-un nod cu tensiune scăzută apare un dezechilibru între puterea activă cerută și cea disponibilă, este posibilă pierderea stabilității sistemului.

Funcționarea îndelungată la tensiune scăzută, în special în perioada vîrfului de seară, poate conduce la o creștere progresivă a deficitului de putere, datorită unor consumatori — în special cei ce folosesc energia electrică pentru iluminat — care caută să compenseze scăderea eficacității receptorilor, prin mărirea numărului acestora. Contribuția consumului gospodăresc la acest efect de agravare a deficitului de putere este deosebit de importantă datorită ponderii sale mari : 20—25% la vîrful de sarcină. De aceea nu trebuie admisă alimentarea consumatorilor casnici la tensiuni scăzute.

O altă cauză ce conduce uneori la mărirea deficitului de putere este reducerea productivității serviciilor auxiliare (în special a pompelor și ventilatoarelor) din centrale, la scăderea frecvenței ; această dificultate este agravată în centralele ce funcționează la tensiune foarte scăzută, datorită greutății de a porni agregate de rezervă antrenate cu motoare electrice.

Pierderile în rețele cresc aproximativ invers proporțional cu scăderea tensiunii.

Funcționarea cu deficit de putere în sistem și la încărcarea maximă a tuturor grupurilor și a majorității elementelor rețelei, mărește mult probabilitatea avariilor — în special a deconectărilor prin suprasarcină și a avariilor din centrale ; probabilitatea avariilor crește de asemenea datorită unor relee de protecție sensibile la variații ale frecvenței și tensiunii. Orice avarie ce apare în centrale sau pe o ramură încărcată a rețelei, în cazul funcționării la parametri scăzuți, va face necesară deconectarea rapidă a unor consumatori însumînd o putere cel puțin egală cu deficitul nou creat, pentru a evita prăbușirea completă a sistemului.

5. EXPLOATAREA SISTEMULUI ENERGETIC CU DEFICIT DE PUTERE

În paragrafele precedente a fost analizată funcționarea sistemului energetic cu deficit de putere, iar apoi s-au studiat urmările pe care regimurile de funcționare cu frecvență și tensiune scăzută le au asupra consumatorilor și asupra sistemului.

Se pune însă problema dacă la un sistem cu deficit de putere toate aceste efecte sînt obligatorii, sau există un mod de exploatare optim care reduce la minimum efectele negative?

Dacă un asemenea mod de exploatare există, este clar că tocmai indicii tehnico-economici corespunzători acestui regim trebuie să fie luați în considerare la determinarea rezervei optime.

Printre variantele posibile de exploatare a unui sistem cu deficit de putere trebuie menționate :

a) Funcționarea sistemului cu tensiune și frecvență scăzute, la valorile la care se ajunge în cazul existenței deficitului de putere prin efectul de autoreglaj după caracteristica statică a sarcinii, reprezintă de fapt neadoptarea nici unei măsuri. Atîta timp cît deficitul este redus și scăderea parametrilor energiei electrice este mică, această soluție este justificată. Dacă însă deficitul este mare și apar fenomene cum ar fi : arderi și blocări de motoare datorită tensiunii scăzute, opriri ale unor procese datorită presiunii insuficiente a electropompelor alimentate la frecvență scăzută, limitări ale puterii disponibile a generatoarelor periferice din sistem, sub puterea nominală, avînd drept consecință agravarea deficitului de putere etc. atunci această soluție nu mai este admisibilă.

b) Secționarea sistemului poate da rezultate bune în anumite cazuri speciale evitînd mai ales accentuarea deficitului prin limitarea puterii disponibile a generatoarelor. Această măsură nu este întotdeauna posibilă. Ea este o măsură riscantă deoarece fracțiunile mici ale sistemului pot fi complet doborîte la apariția unei avarii. În plus, măsura este greoaie, necesitînd multe manevre în sistem. Ea se impune totuși în acele situații speciale create de o anumită configurație a rețelei și de capacitatea insuficientă a acesteia, cînd apare un efect important de reducere a puterii disponibile a generatoarelor. Ea este recomandabilă și în cazul cînd prin aceasta se poate asigura alimentarea cu energie electrică de calitate normală a anumitor consumatori de importanță vitală.

c) Alimentarea cu energie electrică de calitate normală a celor mai însemnați consumatori este posibilă dacă deficitul de putere este neutralizat prin sacrificarea altor consumatori. Sacrificarea, adică reducerea forțată a sarcinii sistemului implică oprirea anumitor agregate și instalații productive, deci micșorarea producției unor ramuri industriale. Aceasta poate crea dificultăți în realizarea proporționalității ramurilor și în echilibrarea bilanțurilor materiale ale economiei naționale. Totuși măsura prezintă avantajul de a evita funcționarea riscată și pericolul de

agravare pînă la proporții catastrofale a unor accidente relativ ușoare ce pot interveni în exploatare (scurtcircuite, supratensiuni atmosferice, defecțiuni la aparate etc.).

Variantele de exploatare a unui sistem cu deficit de putere, enumerate mai sus nu epuizează gama măsurilor care se pot dovedi necesare și utile într-o situație concretă dată. Dimpotrivă se poate chiar afirma că cea mai rațională soluție va rezulta din îmbinarea în proporții judicioase a mai multor măsuri, corespunzătoare particularităților sistemului. Pentru a determina această cale optimă de urmat în exploatarea unui sistem energetic cu deficit de putere, trebuie studiată latura economică a regimurilor posibile, de aceea în continuare se va analiza această latură a problemei.

Funcționarea normală a tuturor consumatorilor, optimă din punct de vedere tehnic și economic, are loc atunci cînd energia electrică este furnizată la parametri nominali. Scăderea frecvenței și tensiunii datorită defecitului de putere, produce asupra sistemului energetic și asupra consumatorilor daune D (lei/oră), cu atît mai mari cu cît abaterea de la normal a calității energiei electrice este mai mare.

Sacrificarea unui consumator de putere P_s produce o anumită redresare a calității energiei electrice deci o reducere a daunelor cu ΔD. Pe de altă parte însă sacrificarea consumatorului este legată de o serie de efecte negative ca: deranjarea procesului tehnologic, reducerea producției, apariția unor consumuri suplimentare de materie primă sau energie etc.; efecte care din punct de vedere economic se exprimă prin daunele D_s.

Dacă $D_s < \Delta D$ sacrificarea este recomandabilă din punct de vedere economic. Ea trebuie aplicată progresiv începînd cu consumatorii care au daunele specifice $d_s = \frac{D_s}{P_s}$ cele mai mici și continuînd atîta timp cît daunele D_s rămîn inferioare reducerii daunelor ΔD provocată de ultimul sacrificiu de putere P_s. Limita peste care operația sacrificării nu mai este avantajoasă se obține pentru egalitatea daunelor.

$$D_s = \Delta D.$$

Raportînd ambii membri la puterea P_s a ultimului consumator sacrificat, limita devine

$$d_s = d,$$

unde $d = \frac{\Delta D}{P_s}$ reprezintă reducerea provocată de micșorarea deficitului de putere cu 1 kW, daunelor totale D, pe care le suferă consumatorii și sistemul din cauza frecvenței și tensiunii scăzute.

Pentru găsirea soluției optime de urmat se aplică deci principiul general al egalității creșterilor relative, utilizat și în alte probleme de optimizare a funcționării sistemului energetic. În cazul de față acest principiu se formulează astfel: daunele provocate ansamblului economiei naționale de existența unui deficit de putere în sistem devin minime dacă se menține în permanență egalitatea între creșterea relativă a daunelor

provocate prin sacrificii și creșterea relativă a daunelor provocate prin funcționarea sistemului cu frecvență și tensiune scăzută.

Pe baza procedeului de mai sus este deci posibil să se găsească modalitatea optimă de exploatare a unui sistem energetic cu deficit de putere, corespunzătoare minimului daunelor totale suferite de economia națională :

$$D^* = D + D_s = \text{minim.}$$

Fiecărei valori a deficitului de putere ΔP îi corespunde o astfel de soluție optimă, ceea ce înseamnă că alegînd mereu modalitatea optimă de exploatare a sistemului se ajunge, pentru diferite valori ale deficitului de putere, la o caracteristică globală a daunelor totale în funcție de deficitul de putere $D^* = f(\Delta P)$. Ținînd seama că în lucrările deja elaborate în domeniul tratării probabilistice a rezervei de putere, relația între deficitul probabil și rezervă este stabilită, rezultă că se poate trasa caracteristica sumei totale C a investițiilor și daunelor, în funcție de mărimea rezervei

$$C = I + D^* = f(R).$$

Derivata acestei sume conduce la mărimea optimă a rezervei.

Pentru rezolvarea practică a problemei este necesar să se traseze caracteristicile creșterilor relative a daunelor în funcție de puterea sacrificată și de deficitul de putere din sistem.

Caracteristica creșterilor relative a daunelor provocate prin sacrificii d_s, în funcție de puterea totală sacrificată P_s se poate construi relativ simplu pe baza analizei procesului de reducere forțată a sarcinii sistemului.

Această reducere poate fi realizată prin următoarele măsuri :

— limitarea puterii consumate în timpul vîrfului de sarcină prin măsuri organizatorice bazate pe deplasarea funcționării anumitor agregate în afara orelor de vîrf ;

— întrerupere programată sau anunțată cu cîteva ore înainte ;

— întrerupere neanunțată (sacrificarea propriu-zisă).

Aici, prin sacrificii se înțeleg toate aceste măsuri care permit reducerea deficitului de putere în sistem impunînd anumite restricții consumatorilor. În cazul limitărilor nu se pot pune în evidență în general nici un fel de daune deși aceste limitări îngreunează organizarea procesului de producție și stînjenesc aplicarea de raționalizări ale tehnologiei. Datorită lipsei daunelor evidente, limitările au intrat în practica obișnuită, fiind stabilite prin contractul de furnizare a energiei electrice ; limitările contractate se vor considera normale și nu vor fi analizate. În cele ce urmează se pornește de la ipoteza că posibilitățile oferite de limitările ce nu provoacă daune au fost pe deplin folosite. În aceste condiții, prima tranșă de consumatori ce urmează a fi sacrificați de putere P_{s1} sînt cei care au cele mai reduse daune specifice $d_{s1} = \dfrac{D_{s1}}{P_{s1}}$. Urmează tranșa a doua P_{s2} cu daunele d_{s2} și așa mai departe în ordinea crescătoare a daunelor specifice

$$d_{s1} < d_{s2} < d_{s3} < \dots$$

Caracteristica creșterilor relative a daunelor provocate de sacrificii $d_s(P_s)$ nu este altceva decît reprezentarea tranșelor în ordinea crescătoare a daunelor (fig. 3).

Pentru obținerea acestei caracteristici este necesară analizarea directă a posibilităților de întrerupere și a daunelor provocate de întreruperea planificată pe fiecare categorie de consumatori în parte.

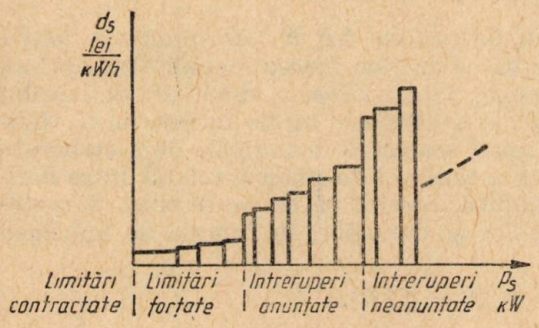


Fig. 3. — Creșterea relativă a daunelor provocate de sacrificii = daune pe kilowattul suplimentar sacrificat.

O serie de studii privitoare la daunele provocate de întreruperi [19] ÷ [23] au arătat că daunele specifice (lei/kWh) sînt cu atît mai mici cu cît procesul tehnologic este mai simplu, produsul fabricat mai ieftin și consumul specific de energie electrică mai mare.

Pentru calculul daunei specifice d_s, se poate utiliza formula aproximativă

$$d_s = h\left(k\,\frac{v-m}{e} + c\right),$$

unde : v — prețul de livrare al produselor fabricate (care conține și valoarea nou creată);

m — costul materiei prime (pe unitatea de produs fabricat) care nu se consumă în cazul opririi producției;

e — consumul specific de energie electrică pe unitatea de produs fabricat în regim normal;

k — coeficient de corecție de ordinul 1,1÷1,5 dacă oprirea și repornirea procesului tehnologic provoacă consumuri suplimentare de materiale și energie;

h — coeficient de corecție subunitar, pînă la valori oricît de mici, dacă procesul tehnologic permite recuperarea deficitului de producție cauzat de sacrificiu;

c — daune conexe, de care trebuie să se țină seama dacă produsul fabricat este vital pentru economia națională. În acest caz deficitul de producție trebuie acoperit fie din import cu prețul V_{imp}, fie prin construirea unor capacități de producție suplimentare care să funcționeze în afara orelor de vîrf și să fabrice produsul respectiv la prețul v', investițiile specifice fiind i pe unitatea de capacitate de producție.

Deci $c = \frac{V_{imp}}{e}$ sau $c = \frac{1}{e}(v' + ir)$ unde r este coeficientul normat de eficacitate a investițiilor în ramura respectivă.

Puterea fiecărei tranșe de sacrificii rezultă prin însumarea puterii unităților ce intră în tranșa respectivă. Într-o primă aproximație cu caracter indicativ, puterea tranșei se poate afla pe baza producției totale pe țară și a consumului specific, așa cum se exemplifică în tabelă.

Procesul tehnologic	Consum*) specific kWh/t	Producție**) R.P.R. 1961 — tone —	Sarcina totală (aproxim.) MW
Carbid	3 200—4 000	60 000	25—30
Sodă caustică	1 450—2 150	129 000	25—30
Ciment	80—100	3 300 000	35—40
Oțel electric	400—900	~170 000	10—12
Laminate	100—250	1 900 000	35—40
Fire bumbac	1 500—2 000	60 000	10—12

Sursa datelor: *) Manualul inginerului electrician; vol. VIII.
**) Anuarul statistic R.P.R. — 1962.

Posibilități favorabile pentru aplicarea sacrificiilor cu daune d_s reduse prezintă în special industriile la care este posibilă o anumită recuperare a deficitului de producție : industriile a căror capacitate de producție nu este utilizată la maximum, industriile cu numai 1 sau 2 schimburi, secțiile de prelucrare mecanică a metalelor etc. Pentru organizarea sacrificiilor e preferabil să se aleagă unitățile consumatoare de puteri mari, astfel încît sacrificiile să fie eficace fără a afecta un număr prea mare de consumatori.

Pentru aplicarea principiului egalității creșterilor relative în scopul obținerii situației optime trebuie determinată pe lîngă creșterea relativă d_s a daunelor provocate din sacrificii și creșterea relativă d a daunelor datorite calității anormale a energiei electrice la variația unitară a deficitului de putere.

Pe baza ecuațiilor care descriu variația parametrilor energiei electrice în sistem (vezi § 2) se poate determina frecvența și nivelul de tensiuni în funcție de deficitul de putere. Cum s-a arătat, valorile abaterilor frecvenței și tensiunii de la valoarea normală determină daunele la consumator datorite calității anormale a energiei electrice furnizate, iar daunele suferite de sistem pot fi exprimate direct în raport cu deficitul de putere. Aceasta înseamnă că daunele totale D, sau creșterea lor relativă $d = \frac{dD}{dP}$ pot fi exprimate în raport cu deficitul de putere.

Pînă în prezent în literatura științifică mondială nu a fost pusă la punct o metodă care să permită rezolvarea practică exactă a acestei pro-

bleme. Lucrările consacrate acestei chestiuni se referă de obicei la domeniul de variație a tensiunii și frecvenței care nu atinge limitele de pierdere a siguranței de funcționare (apariția accidentelor fie la partea electrică, fie la partea tehnologică). În acest domeniu daunele provocate de variațiile de tensiune variază după o lege pătratică [8], [9], [12], [13], iar daunele provocate de variațiile de frecvență după o lege aproape pătratică (la mecanismele cu cuplu constant daunele variază liniar, la pompe și ventilatoare — pătratic, la pompele etajate după o putere mai mare).

În ansamblu, pentru domeniul acesta se poate considera valabilă variația pătratică a daunelor în raport cu deficitul de putere. La intrarea în domeniul de pierdere a siguranței, daunele cresc foarte mult datorită probabilității unor accidente grave, cu opriri ale producției de lungă durată și cu importante urmări economice și sociale. Calitativ, daunele D se prezintă ca în figura 4.

Construirea concretă a caracteristicilor $D(P_{def})$ și $d(P_{def})$ este posibilă pe baza aproximațiilor amintite mai sus și a ecuațiilor de comportare a sistemului.

Dacă se prevede că perioada de funcționare a sistemului cu deficit de putere va fi destul de îndelungată pînă la recuperarea rămînerii în urmă a dezvoltării sistemului, este util a se construi o diagramă pentru conducerea sacrificiilor (fig. 5).

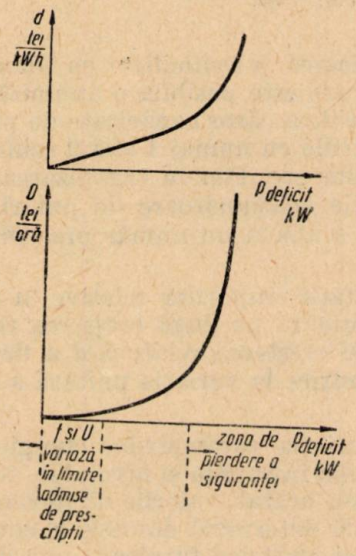
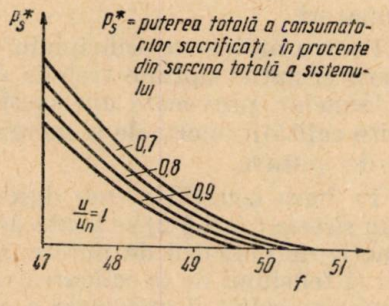


Fig. 4. — Daune totale D provocate de deficitul de putere și creșterea relativă d a acestor daune la variația deficitului de putere cu 1 kW.

Fig. 5. — Sarcina ce trebuie sacrificată pentru ca daunele totale pe economia națională să devină minime.



Aceasta indică direct puterea ce trebuie să se afle în stare sacrificată la anumite valori ale frecvenței și nivelului de tensiuni, pentru ca daunele totale să fie minime.

Este de menționat că pentru construirea unei asemenea diagrame, interesează în special porțiunea din curba $D(P_{def})$ în care daunele cresc mult; panta rapidă a acestei curbe permite micșorarea preciziei necesare

la determinarea valorii daunelor. Este de aceea suficientă precizarea domeniului (pe axa puterilor deficitare) în care curba are această alură și o evaluare aproximativă a valorilor privind daunele corespunzătoare. Un asemenea rezultat se poate obține prin sondaje la cîțiva consumatori tipici și prin urmărirea redresării sistemului în urma sacrificiilor făcute.

În schimb, domeniul de variație lentă a curbei corespunzător variațiilor normale ale tensiunii și frecvenței și unor daune mai mici pentru economia națională, trebuie studiat cu mult mai mare precizie, deoarece aceleași erori asupra daunelor conduc în acest domeniu la erori mult mai mari pentru dezechilibrul de puteri, respectiv pentru puterea reglantă. Or, tocmai acest domeniu al curbei prezintă interes la determinarea soluției optime în proiectele de dezvoltare de perspectivă a sistemului, astfel ca la determinarea eficacității investițiilor pentru obiectivele proiectate să se poată ține seama în mod cît mai corect de factorii calitativi. Folosirea acestor curbe va permite astfel introducerea indicatorilor integrali de calitate (vezi § 2) folosiți pînă în prezent numai ca mărimi criteriale, în calculele economice comparative ale variantelor de proiectare [24].

În acest scop atît cercetările teoretice cît și studiile concrete privind efectele rezervei de putere din sistemul electroenergetic asupra consumatorilor și a condițiilor de funcționare ale sistemului, vor trebui adîncite. Aceste studii vor putea fi utile totodată pentru alegerea unor indici de plan calitativi putînd fi folosiți la aprecierea modului de exploatare al sistemului electroenergetic, pentru stimularea personalului operativ, întrucît este cunoscut că volumul producției de energie electrică depinde numai de consumatori, astfel încît indicii cantitativi reflectă în măsură insuficientă eforturile depuse de personalul operativ al sistemelor electroenergetice pentru îmbunătățirea calității exploatării.

6. CONCLUZII

Pentru determinarea rezervei de putere optime este necesar să se cunoască efectele economice ale deficitului de putere, atît asupra consumatorilor cît și asupra sistemului energetic însuși. Analiza întreprinsă arată că variația daunelor provocate de deficitul de putere este de așa natură încît mărimea optimă a deficitului (corespunzătoare rezervei optime de putere) se găsește în domeniul valorilor care conduc la abateri ale frecvenței și tensiunii în jurul celor actualmente admise de norme.

Pentru rezolvarea concretă a problemei este necesar să se calculeze cu precizie caracteristica daunelor în funcție de indicii de calitate a energiei electrice.

Pentru valori mari ale deficitului probabil de putere, amploarea daunelor pe care le suferă economia națională crește rapid. O mare parte din efectele negative la consumator, în sistem și pe ansamblul economiei naționale nu poate fi sesizat imediat și calculat valoric. Multe efecte se manifestă cu întîrziere; capătă amploare „daunele conexe"; este posibil să apară nevoi de import și de investiții pentru anumite produse

vitale; apar efecte sociale etc. Toate acestea, chiar neexprimate valoric, sînt suficiente pentru a impune luarea unor măsuri urgente în vederea restabilirii calității normale a energiei electrice prin eliminarea deficitului de putere și prin dezvoltarea corespunzătoare a rețelelor.

Pentru exploatarea unui sistem energetic cu deficit de putere există o soluție optimă, care — la valori mari ale deficitului — impune reducerea forțată a sarcinii într-o anumită măsură, determinată astfel încît daunele totale provocate prin sacrificii și prin funcționarea cu frecvență și tensiune scăzută, să fie minime. Tocmai această valoare minimă a daunelor totale este cea care trebuie să fie luată în considerare la determinarea mărimii optime a rezervei de putere.

Importanța studierii aspectelor economice legate de calitatea energiei electrice depășește cadrul problemei determinării rezervei optime de putere.

Ea permite abordarea științifică, dintr-un punct de vedere nou, a problemelor legate de proiectarea și funcționarea rețelelor, de conceperea schemelor optime de alimentare a consumatorilor precum și de organizarea exploatării sistemelor energetice.

Importanța calității energiei electrice precum și particularitatea sa de a nu putea fi stocată, fac posibilă și necesară adoptarea indicilor de calitate printre indicatorii de bază pentru aprecierea activității sectorului energiei electrice, în locul producției totale de energie electrică, deoarece aceasta este impusă de cererea consumatorilor și caracterizează deci în primul rînd dezvoltarea economiei în ansamblu.

ANEXA 1

EXEMPLE DE FUNCȚIONARE A SISTEMULUI LA PARAMETRI DIFERIȚI DE CEI NOMINALI

a. *Funcționarea sistemului la frecvență scăzută și tensiune normală*

În sistemele în care există suficientă rezervă de putere reactivă și o capacitate de transport corespunzătoare, o lipsă de putere activă antrenează numai o scădere a frecvenței, nivelele de tensiuni rămînînd aproximativ cele normale. Rigiditatea tensiunii este favorizată de o caracteristică a sarcinii funcție de frecvență $P^*(f^*)$ cu pantă mare, ce apare dacă preponderează motoarele și în special cele ce antrenează pompe și ventilatoare.

Pentru exemplificare, s-a considerat cazul unui sistem ce poate fi redus la schema echivalentă reprezentată în figura 6. În figura 6 *a*, au fost indicate în valori relative încărcările și parametrii corespunzători regimului limită, la care puterea produsă satisface cererea, la parametri nominali.

Figura 6 *b*, corespunde regimului creat prin adăugarea unei suprasarcini de 5%, în ipoteza caracteristicii tip, pentru sarcină, dată de Teploelectroproiect (fig. 1).

Figura 6 *c*, corespunde regimului creat prin adăugarea unei suprasarcini de 5%, în ipoteza unui coeficient de autoreglaj al sarcinii de 1,5. S-a considerat că sarcina ce se adaugă

are aceleaşi caracteristici şi acelaşi factor de putere ca şi cea existentă şi că la centrale capacitatea de reglare a fost epuizată, iar coeficientul de autoreglaj al turbinelor nu introduce o supraîncărcare sensibilă, factorul de putere nominal al grupului echivalent : $\cos \varphi_n = 0{,}8$.

Factorul de putere $\cos \varphi = 0{,}93$ la consumator, în regimul limită, reflectă existenţa unei rezerve de putere reactive locale corespunzătoare, iar tensiunile corespund unei capacităţi suficiente a liniilor de transport. Ca urmare, generatoarele sînt încărcate la un factor de pu-

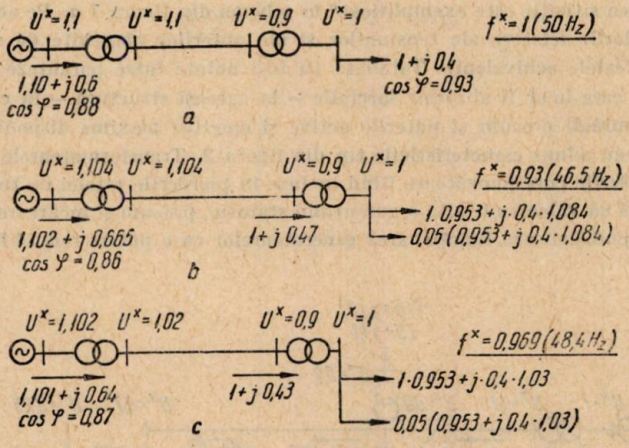


Fig. 6. — Schema echivalentă a unui sistem ce funcţionează la tensiune nominală : *a*. — în regim normal ; *b*, *c* cu un deficit de putere de 5 %
b. — la o caracteristică a sarcinii de tip Teploenergiproiect
c. — la un coeficient de autoreglaj al sarcinii de 1,5.

tere superior celui nominal ($\cos \varphi = 0{,}88 > \cos \varphi_n = 0{,}8$) ceea ce asigură o rezervă atît în privinţa curentului statoric, cît şi a celui rotoric. Prin reglarea excitaţiei este astfel posibilă menţinerea nivelului de tensiuni. Pierderile în reţea cresc cu o cantitate infimă.

Se observă însă că unei suprasarcini de numai 5 % îi corespunde o scădere a frecvenţei relativ mare : la 46,5 Hz, resp. 48,4 Hz, în cazul unui statism mare al sarcinii.

Întrucît datorită reglajelor şi a măsurilor luate de consumator pentru compensarea deficitului de putere, caracteristica puterii active a sarcinii în funcţie de frecvenţă se poate aplatisa, scăderea de frecvenţă ce corespunde unei suprasarcini de 5 %, poate fi şi mai mare, în cazul unor nivele constante ale tensiunii. Funcţionarea la o asemenea frecvenţă scăzută poate fi periculoasă pentru turbine, în cazul în care ele se apropie la această frecvenţă de una din frecvenţele critice.

Pe de altă parte, la această frecvenţă puterea pompelor de alimentare şi a ventilatoarelor scade la 80—90 % din cea nominală. Dacă există o rezervă suficientă la serviciile auxiliare ale centralei, această scădere a puterii poate fi compensată prin reglarea vanelor sau pornirea unor agregate suplimentare, în caz contrar, la frecvenţă scăzută, centralele nu mai pot debita puterea maximă disponibilă, astfel încît deficitul de putere creşte şi o dată cu aceasta, frecvenţa scade foarte repede. Dacă nu se iau măsuri pentru restabilirea echilibrului puterilor, poate apare o avarie de sistem.

b. *Funcționarea sistemului la tensiune scăzută și frecvență constantă*

Scăderea tensiunii în unele noduri ale sistemului electroenergetic, denotă o insuficientă capacitate a rețelei de transport sau lipsa rezervei de putere reactivă. În cazurile în care la nodurile la care tensiunea este scăzută sînt conectate centrale electrice, puterea disponibilă poate să scadă mult, astfel încît scade rezerva în sistem și se micșorează sarcina limită la care apare deficitul de putere.

O asemenea situație este exemplificată în schema din figura 7 *a*. Pe această schemă au fost indicate valorile relative ale tensiunilor și ale puterilor absorbite de sarcini, respectiv debitate de centralele echivalente. Totodată au fost notate între paranteze valorile relative ale puterilor pe care le-ar fi absorbit sarcinile — la aceeași structură — în cazul funcționării la parametri nominali precum și puterile active și reactive maxime disponibile în centrale. Pentru sarcini s-au admis caracteristicile tip din figura 2. Transformatoarele au fost considerate ideale, pierderile corespunzătoare fiind incluse în pierderile rețelei de transport.

Se observă că valoarea limită a curentului statoric, precum și încărcarea limită a transformatoarelor, condiționează funcționarea generatoarelor cu o putere redusă în cazul reducerii

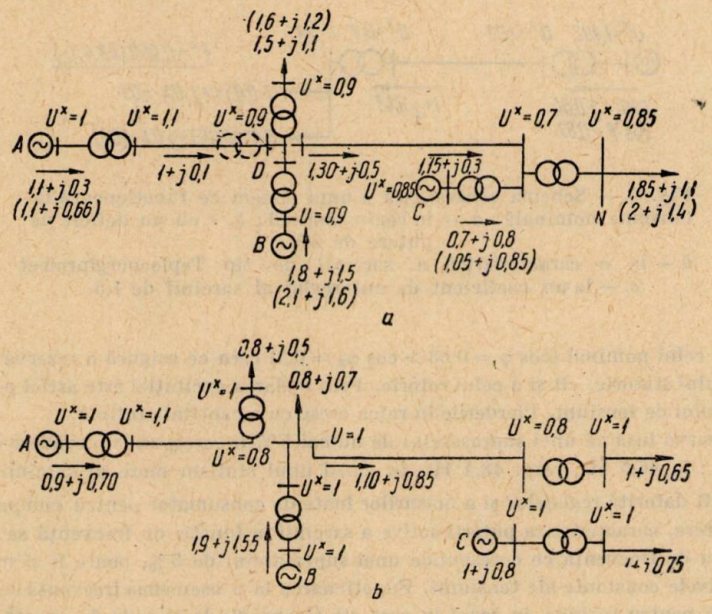


Fig. 7. — Schema echivalentă a unui sistem cu deficit de putere reactivă locală : *a* — funcționarea la tensiune scăzută ; *b* — redresarea tensiunii prin divizarea sistemului.

tensiunii la borne. Astfel deși la funcționarea la parametrii nominali ar trebui să existe în sistemul considerat o rezervă de 15%, în condițiile funcționării cu o capacitate redusă a rețelei de transport și o producție locală insuficientă de putere reactivă (ca în schema din fig. 7 *a*) rezerva de putere activă este anulată, iar puterea furnizată consumatorilor este numai de 93%.

din cea cerută ; îmbunătăţirea condiţiilor de funcţionare în cazul analizat poate fi realizată prin îmbunătăţirea factorului de putere la consumatori şi inserarea unui autotransformator ridicător în nodul *D*.

În unele cazuri, dacă configuraţia reţelei este favorabilă, se poate recurge într-o perioadă tranzitorie, pînă la întărirea capacităţii de transport, la soluţia divizării sistemului, ca în schema aproximativă din figura 7 *b*. La funcţionarea, după o asemenea schemă, întreaga rezervă din centrale este utilizabilă : se renunţă însă în felul acesta la ajutorul reciproc dintre centrale, urmărit prin interconectarea acestora.

Dacă nici una din soluţiile menţionate nu este aplicabilă, se poate recurge în perioada tranzitorie la deconectarea a o parte din consumatori pentru descărcarea reţelei de transport. Astfel, dacă în reţeaua analizată se întrerup în nodul N consumatori cu o putere cerută de 0,3 + j 0,3 — care reprezintă circa 8% din sarcina totală a reţelei, reţeaua este readusă la condiţiile normale de funcţionare : sporul de sarcină activă şi reactivă, ce apare în urma creşterii tensiunii la consumatorii nesacrificaţi, poate fi acoperit în acest caz în bune condiţiuni de generatoarele din centrală.

c. *Funcţionarea sistemului la tensiune şi frecvenţă scăzută*

În numeroase cazuri, la apariţia unui deficit de putere activă nu există o rezervă suficientă de putere reactivă în sistem pentru menţinerea nivelelor de tensiuni la valorile normale. Cîtă vreme mai există o rezervă de putere reactivă locală, frecvenţa sistemului scade, pînă la epuizarea acesteia. În continuare, pentru acoperirea surplusului de putere reactivă, datorit atît creşterii sarcinii reactive, cît şi caracteristicii ascendente a puterii reactive la scăderea frecvenţei, este necesar să se apeleze la puterea reactivă a centralelor depărtate, ce nu o pot furniza decît cu o cădere mare de tensiune.

Din caracteristicile sistemului, raportate la nodurile în care apare un dezechilibru de puteri, şi din caracteristicile sarcinii, rezultă valorile tensiunii şi frecvenţei la care regimul se stabilizează.

Dacă se poate reduce sistemul la o schemă radială, ecuaţiile liniarizate ale regimului devin :

$$\left(\frac{\partial Q_G}{\partial U}\right)_{f=\text{const.}} \Delta U^* + \left(\frac{\partial Q_G}{\partial f}\right)_{U=\text{const.}} \Delta f^* = \left(\frac{\partial Q_s}{\partial U}\right)_{f=\text{const.}} \Delta U^* + \left(\frac{\partial Q_s}{\partial f}\right)_{U=\text{const.}}^{*} \Delta f^*$$

$$\left(\frac{\partial P_G}{\partial U}\right)_{f=\text{const.}} \Delta U^* + \left(\frac{\partial P_G}{\partial f}\right)_{U=\text{const.}} \Delta f^* = \left(\frac{\partial P_s}{\partial U}\right)_{f=\text{const.}} \Delta U^* + \left(\frac{\partial P_s}{\partial f}\right)_{U=\text{const.}} \Delta f^*$$

unde indicele *G* se referă la sistem, iar indicele *s* la sarcină. Se observă că abaterea frecvenţei, se reduce faţă de cazul funcţionării la tensiune constantă.

Scăderea tensiunii la deficit de putere activă, este importantă tocmai în reţelele în care tensiunile sînt scăzute în anumite noduri, chiar înainte de apariţia deficitului de putere activă. În acest caz scăderea în continuare a tensiunii este deosebit de periculoasă, putînd conduce la pierderea stabilităţii sistemului.

Anexa 2

Efectele scăderii tensiunii şi frecvenţei asupra receptoarelor electrice [15], [16], [17]. [18]

Nr. crt.	Tipul receptorului	Scăderea frecvenţei la tensiune constantă	Scăderea tensiunii la frecvenţă constantă	Scăderea frecvenţei şi a tensiunii
1	Motoare asincrone cu cuplu rezistent constant (maşini unelte, mori, războaie de ţesut)	Viteza şi puterea maximă scad proporţional cu frecvenţa; la funcţionarea continuă cu sarcină maximă, productivitatea scade proporţional cu frecvenţa. La maşini cu viteză reglabilă funcţionînd la o sarcină inferioară celei maxime şi în cazul funcţionării intermitente sau cu timpi morţi importanţi, productivitatea scade mai puţin decît frecvenţa : la 45 Hz cu 3—5%	La variaţii mici de tensiune, scade randamentul motorului şi creşte uzura — în special dacă motorul funcţionează continuu în apropierea sarcinii maxime. Creşterea uzurii măreşte probabilitatea deteriorării şi deci a întreruperilor producţiei	Scăderea productivităţii este sensibil aceeaşi ca şi la tensiune constantă, iar uzura, comportarea la suprasarcină este puţin îmbunătăţită faţă de situaţia la frecvenţă constantă, acest lucru depinzînd de raportul dintre abaterea tensiunii şi a frecvenţei de la valorile nominale
2	Motoare asincrone cu cuplu rezistent centrifugal (pompe, ventilatoare)	Debitul scade proporţional cu frecvenţa, iar presiunea proporţional cu pătratul frecvenţei. De exemplu : la 45 Hz, debitul scade cu 10%, presiunea cu circa 20%, puterea utilă cu 30%	La o scădere a tensiunii cu 20%, curentul la cuplu nominal creşte cu 20 — 25%. Supratemperatura poate deveni inadmisibil de mare şi funcţionarea continuă la sarcină nominală conduce în mod accelerat la deteriorarea motorului. Orice suprasarcină mecanică sau scădere suplimentară de tensiune poate conduce la deconectarea motorului. Reglarea protecţiei de suprasarcină este dificilă. La o scădere a tensiunii cu 25—30% pornirea motorului în sarcină poate deveni imposibilă	Scăderea productivităţii la scăderea frecvenţei este aceeaşi ca şi la tensiune constantă, uzura şi pericolul de deconectare la tensiune scăzută sînt mai reduse decît în cazul frecvenţei constante. La o scădere a tensiunii cu 25 — 30% pornirea în sarcină poate fi imposibilă
3	Motoare asincrone cu alunecare mare (laminoare, ciocane etc.)	Comportarea depinde de caracteristica cuplului rezistent; în	Viteza şi deci productivitatea scad cu tensiunea. De exemplu la un laminor studiat*) la o	Scăderea productivităţii datorită scăderii tensiunii se adaugă la cea datorită scăderii frecven-

*) Rezultate obţinute de Academia R.P.R., Institutul de energetică, în studiul menţionat la capitolul 3.

		general cuplul este constant (v. poz. 1)	scădere a tensiunii de 20% au rezultat scăderi ale productivității de 4 — 11%. Creșterea uzurii, comportarea la suprasarcină și la pornire — ca la poziția 1 și 2	ței. În exemplul considerat, la 45 Hz și o scădere a tensiunii cu 20%, productivitatea va scădea cu circa 20%
4	Motoare de curent alternativ cu colector, de tip serie.	Nu are efect	Cuplul maxim scade cu pătratul tensiunii, crește pericolul de deconectare la suprasarcină	
5	Idem de tip derivație		Viteza de rotație maximă scade cu tensiunea	
6	Motoare sincrone	Efectele sînt similare celor care apar la motoarele asincrone cu alunecare mică; în general mașinile sînt din punct de vedere funcțional mai puțin sensibile la variații ale tensiunii		
7	Motoare serie (tracțiune), alimentate de redresoare fără reglaj de tensiune	Nu are efect	La cuplu constant viteza crește întrucîtva, astfel încît uzura crește în mai mică măsură decît la motoare asincrone. Cuplul maxim scade însă cu pătratul tensiunii, încît crește pericolul de deconectare la suprasarcină	
8	Motoare derivație (laminoare, mașini unelte și de ridicat), alimentate de redresoare fără reglaj de tensiune		Productivitatea scade cu pătratul tensiunii	
9	Instalații electrochimice (galvanizare, încărcarea acumulatoarelor), alimentate de redresoare fără reglaj de tensiune		Productivitatea la încărcare maximă, scade cu pătratul tensiunii. Sub o anumită limită specifică fiecărei instalații, procesul tehnologic nu poate continua	
10	Instalații alimentate de redresoare cu reglaj de tensiune		La variații de tensiune ce depășesc domeniul de reglaj, situația este aceeași ca la poz. 7, 8, 9	

anexa 2 (continuare)

Nr. crt.	Tipul receptorului	Scăderea frecvenței la tensiune constantă	Scăderea tensiunii la frecvență constantă	Scăderea frecvenței și a tensiunii
11	Cuptoare, sudură	În cazul cuptoarelor cu inducție, productivitatea scade cu frecvența și totodată poate scădea și calitatea produsului. În celelalte cazuri, scăderea frecvenței nu are efect	În cazul funcționării la sarcină maximă, nu este posibilă reglarea regimului la valoarea optimă a temperaturii ceea ce conduce la scăderea randamentului și a productivității. La un cuptor electric cu arc pentru topirea oțelului cu o tensiune nominală de 6 000 V, a rezultat o scădere a productivității de 3,5 % la 5 500 V. resp. de 9,5 % la 5 000 V *)	
12	Mecanisme folosind electromagneți	Funcționarea cu frecvență redusă duce la creșterea curentului, deci la mărirea pierderilor, a uzurii și eventual la deteriorare	Forța dezvoltată variază proporțional cu pătratul tensiunii, astfel încît la o tensiune scăzută poate deveni insuficientă	Efectele opuse ale scăderii tensiunii și frecvenței se pot compensa în anumite cazuri favorabile
13	Lămpi cu incandescență	Nu are efect	Fluxul luminos scade foarte repede, la scăderea tensiunii, astfel, la o tensiune de 0,9 U_N valoarea relativă a fluxului luminos față de cea corespunzătoare tensiunii nominale este de 0,67 iar la 0,8 U_N de 0,44 [15]	

*)Rezultate obținute de Academia R.P.R., Institutul de energetică în studiul menționat la capitolul 3.

Anexa 3

Efectul întreruperilor electrice asupra diverselor procese tehnologice şi valorile daunelor specifice

Procesul tehnologic	Efectul întreruperii	Valoarea daunelor specifice în funcţie de durata întreruperilor		
		durata întreruperii θ minute	dauna specifică d lei/kWh	dauna specifică δ lei/minut
1	2	3	4	5
Distilarea atmosferică şi sub vid)* Se presupune alimentarea cu apă de răcire asigurată şi în timpul întreruperii electrice	La apariţia unei întreruperi electrice, se opresc motoarele electrice care acţionează pompele ce vehiculează materialul prin instalaţie Pentru a evita supraîncălzirile şi stagnările (care duc la cocsări şi apoi la explozii) se sting focurile şi se pornesc imediat pompele de rezervă, acţionate cu abur Dacă nu revine tensiunea după 7 minute se trece la oprirea şi golirea instalaţiei (cu care ocazie se amestecă între ele fracţiunile separate deoarece procesul tehnologic nu poate fi condus, din cauza nefuncţionării aparatelor de măsură, a aparatelor de reglat etc. Readucerea instalaţiei la starea de regim depinde de timpul cît a durat întreruperea electrică (pentru întreruperi de 3 ore, producţia stagnează 6,5 ore)	0 15 30 180	0 60 105 86	0 400 680 495
Cracarea termică pînă la reziduu, în fază mixtă, selectivă, cu dublu circuit)* Se presupune alimentarea cu apă de răcire asigurată şi în timpul întreruperii electrice	La apariţia întreruperilor electrice se opresc motoarele electrice care acţionează pompele ce vehiculează materialul prin instalaţie. Trebuie stinse focurile la cuptoare şi pornite pompele de rezervă acţionate cu abur. Dacă $\theta > 5$ min instalaţia se trece pe recirculare, iar dacă $\theta > 25$ min trebuie oprită şi descărcată (pierzîndu-se cheltuielile de prelucrare a materialului din instalaţie) din cauza deteriorării turbinelor pompelor de alimentare ale cuptoarelor de materii prime. Întreruperi mai mari de 25 min provoacă oprirea producţiei pe 47 ore	0 5 25 $25+\varepsilon$ 180	25 30 440 123 115	500 384 2 000 23 175 3 628
Cocsarea întîrziată)* Se presupune alimentarea cu apă de răcire asigurată şi în timpul întreruperii electrice	Motoarele electrice de acţionare se opresc pentru ca materialul să nu cocseze în coloane, se sting focurile şi se pornesc pompele de rezervă (abur) reducînd treptat parametrii regimului tehnologic. La $\theta > 30$ min, instalaţia este trecută pe recirculare, iar la apariţia tensiunii, revenirea la funcţionarea normală necesită 4—5 ore	0 5 $5+\varepsilon$ 180	30 30 822 140	181 250 2 745 190

*) C. Guţu, I. Iordache, A. Soci, *Calculul daunelor provocate de întreruperile electrice la rafinarea ţiteiului*. Academia R.P.R., Institutul de energetică, Bucureşti, 1962.

Anexa 3 (continuare)

Procesul tehnologic	Efectul întreruperii	Valoarea daunelor specifice în funcție de durata întreruperilor		
		durata întreruperii θ minute	dauna specifică d lei/kWh	dauna specifică δ lei/minut
1	2	3	4	5
*Cracare catalitică cu strat fluidizat**) Se presupune alimentarea cu apă de răcire asigurată și în timpul întreruperii electrice	La întreruperi oricît de mici, se înfundă conducta de transport a regeneratorului, atrăgînd după sine oprirea întregii instalații, pentru a cărei repornire sînt necesare circa 8 ore. La întreruperi de 5 min are loc blocarea aparatelor de control și reglaj, ceea ce provoacă o creștere mai mare a opririi producției. Întreruperi de 90 min cauzează oprirea producției pentru 24 ore, fapt explicabil prin răcirea regeneratorului pînă sub 350°C, valoare la care combustibilul injectat nu se mai autoaprinde și implică golirea regeneratorului, răcirea acestuia și apoi pornirea normală	2 90 90+ε 180	370 50 75 45	23 000 500 500 500
*Instalații de absorbție și fracționare a gazelor**) Se presupune alimentarea cu apă de răcire asigurată și în timpul întreruperii electrice	La întreruperi sub 15 min, funcționarea instalațiilor continuă, temperaturile și presiunile în instalații crescînd, în limite admise. La întreruperi mai lungi, presiunea în circuitul de refulare al compresoarelor de alimentare atinge valori la care acestea nu mai pot funcționa și se opresc. Procesul tehnologic se dereglează (aparatele de reglaj și control nu funcționează), cu atît mai mult, cu cît întreruperile sînt mai lungi; readucerea parametrilor la regim normal crește cu durata întreruperii electrice	0 15 15+ε 180	80 65 125 155	400 225 420 420
Elaborarea fontei [23] S-a presupus că întreruperea alimentării electrice nu afectează funcționarea suflantelor instalațiilor de vînt și a pompelor stațiilor de apă de răcire	Efectele întreruperilor electrice depind de situația în care se găsește instalația de încărcare a furnalului (a cărei acționare se face cu motoare electrice) în momentul întreruperii; — dacă clopotul mare al instalației de încărcare este închis, producția furnalului scade (nu se mai poate încărca) și la revenirea tensiunii procesul se reia imediat; — dacă clopotul mare este deschis, gazul de furnal iese afară, se aprinde și în 30 min (dacă $\theta > 30$ min) distruge instalația de încărcare, oprind producția pe 5 zile	0 30 30+ε 180	0 10 350 60	0 200 8 000 1 500

*) Vezi nota de la p. 505.

Anexa 3 (continuare)

Procesul tehnologic	Efectul întreruperii	Valoarea daunelor specifice în funcție de durata întreruperilor		
		durata întreruperii θ minute	dauna specifică d lei/kWh	dauna specifică δ lei/minut
1	2	3	4	5
Producerea cocsului metalurgic [23] În uzina cocsochimică. Se presupune alimentarea cu apă de răcire asigurată în timpul întreruperii electrice	Întreruperile electrice provoacă perturbații la toate fazele procesului tehnologic : — blocarea concasoarelor de la faza de pregătire a șarjelor ; — întreruperea încălzirii cuptoarelor de cocsificare (ceea ce provoacă o oprire a producției pe un timp îndelungat necesar aducerii cuptorului la temperatura de regim) ; — oprirea exhaustoarelor de la secția chimică la $\theta > 15$ min și pierderea gazului de cocs în atmosferă ; pentru evitarea pericolului de explozie se spală continuu conductele timp de 4 ore iar restabilirea procesului tehnologic are loc în 10 ore după apariția tensiunii	0 15 15+ε 180	360 20 200 25	7 200 400 6 500 900
Laminarea [23] Se presupune alimentarea cu apă de răcire asigurată și în timpul întreruperii electrice	Răcirea cuptoarelor (o dată cu oprirea ventilatoarelor de aer), deci scăderea temperaturii lingourilor sub temperatura prescrisă. Dacă barele sînt surprinse între cilindrii laminorului și $\theta > 2$ min, sînt necesare demontări parțiale și manevre complicate (în medie două ore) pentru scoaterea barelor răcite dintre cilindri	2 2+ε 54 180	25 5 5 5	4 000 32 520 2 000 1 300
Elaborarea oțelului Siemens Martin [23] Se presupune alimentarea cu apă de răcire asigurată, în timpul întreruperii electrice	Răcirea cuptoarelor din cauza opririi ventilatoarelor de aer ce asigură tirajul artificial Prelungirea procesului tehnologic cu timpul necesar revenirii la situația termică din momentul apariției întreruperii electrice	0 10 10+ε 180	12 27 77 42	1 000 1 000 3 000 1 300
Elaborarea oțelului electric [23]	Răcirea cuptorului este diferită în funcție de faza de elaborare a oțelului în care se afla cuptorul în momentul apariției întreruperilor	0 60 120 180	0,3 0,95 1 1	43 43 43 43

Anexa 3 (continuare)

Procesul tehnologic	Efectul întreruperii	Valoarea daunelor specifice în funcţie de durata întreruperilor		
		durata întreruperii θ minute	dauna specifică d lei/kWh	dauna specifică δ lei/minut
1	2	3	4	5
Producerea firelor sintetice poliamidice (policaprolactamă) [22] Se înţeleg procesele de sinteză a monomerului (pornind de la fenol, ciclohexanoxină, ε-caprolactamă); — de polimerizare (continuă sub pres., cu fază de demonomerizare sub vid şi fază de egalizare) şi filare a polimerului; — de prelucrare textilă S-a presupus că alimentarea cu abur se întrerupe o dată cu alimentarea electrică iar întreruperile electrice nu sînt anunţate în prealabil	La întreruperi în alimentare de cîteva secunde, pompetele de filare şi maşina de înfăşurare (acţionate electric) declanşează, filarea se întrerupe; restabilirea filării normale are loc abia după 5 ore de la revenirea tensiunii, în tot acest timp debitîndu-se fire rebut. La întreruperi de 15 min polimenul îngheaţă în pompetele de filare, iar readucerea în funcţionare normală necesită în medie 28 ore, din care timp de 9 ore se livrează fire rebut. La întreruperi de 20 min se rebutează întregul conţinut de polimer al instalaţiei de polimerizare din cauza degradării, prin răcire (eliminarea materialului făcîndu-se prin parcurgerea în continuare a procesului tehnologic). La întreruperi ce depăşesc 50 min se avariază coloana de polimerizare (din cauza dispariţiei încălzirii electrice) prin congelarea în ea a materialului, avariere ce întrerupe producţia fabricii pe 5 zile	2 20 20+ε 50 50+ε 180	900—6 150—3 150—5 100—6 400—6 200—4	58 000 10 000 10 000 10 000 25 000 20 000
Filarea bumbacului cardat şi finisarea ţesăturilor de bumbac [21] S-a presupus că alimentarea cu abur nu se întrerupe o dată cu alimentarea electrică	La întreruperi electrice, motoarele electrice care antrenează maşinile textile se întrerup, filarea se opreşte. La revenirea tensiunii toate repornesc rapid, afară de maşinile de filat cu inele, care provoacă o întîrziere de 10 minute. Finisajul ţesăturilor de bumbac reporneşte cu o întîrziere de circa 10 minute după întreruperi electrice de diferite durate, timp necesar pentru înlăturarea unor degradări de materiale care sînt ocazionate de întreruperi electrice neanunţate. — Arderea materialului în maşina de pîrlit; — Degradarea în maşina de acidulare, în maşina de clorare, în jighere, în maşinile de vaporizat, în maşinile de imprimat, în maşina de uscat.	0 10 30 30+ε 180	39,7 18,8 40 175,2 46,1	7 609 480 550 4 480 935

КАЧЕСТВО РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЕЕ СВЯЗЬ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ РЕЗЕРВА МОЩНОСТИ

РЕЗЮМЕ

Для технико-экономического определения резерва мощности надо иметь в виду не только капиталовложения, соответствующие установленной мощности, но и экономические последствия возможного дефицита мощности для потребителей, а также самой энергосистемы.

Дефицит мощности, величина и вероятность которого зависит от размера резерва мощности, увеличивает число вынужденных перерывов и длительных отклонений частоты и напряжения тока.

Все это сопровождается нежелательными последствиями в работе системы, а также для потребителей. В статье изучаются эти последствия и рассматриваются возможности работы системы с дефицитом мощности. Делается вывод, что существует оптимальный режим эксплуатации системы, характеризующейся необходимостью отключения определенных потребителей. Отмечается необходимость дальнейшего изучения вопросов по поводу оптимизации работы и развития энергетических систем.

BIBLIOGRAFIE

1. G. Brossa, *Determinazione dello sviluppo dei sistemi elettrici di produzione con il metodo probabilistico*. Elettrotecnica, **XLVIII**, *4*, 251—262 (1961).
2. C. Gutu, *Determinarea rezervei de putere în sisteme interconectate ideal*. St. cerc. energ., **XI**, *2*, 227—240 (1961).
3. I. M. Markovici, *Sisteme energetice. Regimuri de funcţionare*. Edit. tehnică, Bucureşti, 1960.
4. Van Mele, A. Calvaer, C. Marique, *Le problème de réserves dans l'industrie de la production d'électricité en Belgique*. Bulletin scientifique „Montefiori", mars, *3*, 187 (1956).
5. И. М. Маркович, *Основные режимные принципы выбора величины и размещения резерва активной мощности в энергетических системах*. Электричество, *3*, 11—17 (1959).
6. * * * *Prescripţii de exploatare tehnică a centralelor şi reţelelor electrice*. Edit. energetică de Stat, 1954.
7. E. Arie, *Caracteristici nodale de putere ale sistemelor electroenergetice interconectate radial*. St. cerc. energ., **11**, *1* (1961).
8. P. Ailleret, *L'introduction de la mesure dans la notion de l'analyse du service d'une distribution de l'électricité et son intérêt au point de vue de la conception des réseaux*. Bull. SFE, 7ème série, **6**, *61*, 7 (1956).
9. В. А. Веников, Л. А. Солдаткина, *К вопросу о критериях качества электроэнергии и качества автоматического регулирования режима электросистем*. Электричество, *12*, 21—27 (1959).
10. * * * *Всесоюзная конференция по качеству напряжения и его регулированию в электрических сетях и системах*. Электричество, *6*, 89—92 (1962).
11. P. Gaussens, P. Cazalet, *Le réglage de la tension dans les réseaux de distribution*. Bull. SFE, t. I-8-ème série, *7*, 478—496 (1960).
12. J. Kotarba, *Wrazliwose odbiornikov odchjlenia napiecia*. Energetyka Przemysrowa, **X**, *1* (1962).

13. Н. С. БЕССМЕРТНЫЙ, *О качестве энергии и регилировании напряжений в городских электрических сетях*. Электричество, *10*, 21—26 (1962).
14. Б. А. КОНСТАНТИНОВ, *О качестве напряжения на промышленных предприятиях*. Электричество, *5*, 1—5 (1963).
15. C. PENESCU, *Efectul variațiilor de tensiune și frecvență asupra regimului de funcționare al consumatorilor*. Conferința electricienilor din R.P.R., 1957.
16. W. REISSIG, *Probleme de exploatare în industria grea în cazul exploatării cu centrală proprie*. Energietechnik, **7**, *3*, 124—127 (1957).
17. Y. ERNAULT, M. SALIGNI, *Comportement des groupes turboalternateurs et des services auxiliaires d'une centrale thermique lors d'accidents sur le réseau*. RGE, *71*, 3 (1962).
18. CH. QUICK, *Transients trouble suburban industries. Outages of plants outside load centers are traced to excessive control sensitivity*. El. World-Febr., *10*, 56 (1958).
19. C. GUȚU, M. PETCU, A. SOCI, *Determinarea daunelor provocate de întreruperea alimentării cu energie electrică*. St. cerc. energ., **XI**, 613 (1961).
20. — *Daune provocate de întreruperea alimentării cu energie electrică la fabricarea mătăsii viscoză*. St. cerc. energ., **XII**, *1*, 25 (1962).
21. — *Calculul efectelor economice provocate de întreruperile electrice la filaturile de bumbac și la finisajul țesăturilor de bumbac*. Industria textilă, **13**, *8*, 309 (1962).
22. — *Daune prin întreruperea alimentării cu energie electrică la fabricarea fibrelor sintetice poliamidice*. St. cerc. energ., **XII**, *2*, 229 (1962).
23. C. GUȚU, I. IORDACHE, A. SOCI, *Consecințele economice ale întreruperilor electrice în procesele siderurgice*. St. cerc. energ., **XII**, *2* (1963).
24. Н. А. МЕЛЬНИКОВ, *Регулирование напряжения в электросистемах и повышение качества энергии*. Электричество, *8*, 9—18 (1962).

DETERMINAREA EFECTULUI ECONOMIC AL VARIAȚIILOR DE TENSIUNE ASUPRA CONSUMATORILOR

DE

CONSTANTIN GUȚU, MIHAI PETCU și ANTOANETA SOCI

621.316.1.015.2.003.1

1. INTRODUCERE

Asigurarea calității energiei electrice livrate consumatorilor este o preocupare de prim ordin a proiectanților și a personalului de exploatare a sistemelor energetice. Factorii care definesc calitatea energiei electrice la consumator sînt : continuitatea alimentării, constanța frecvenței, constanța tensiunii, puritatea undei de tensiune, echilibrajul tensiunilor pe faze.

Dezvoltarea sistemelor electrice și automatizarea lor cer cu insistență stabilirea de criterii precise de evaluare a calității deservirii consumatorilor și a calității funcționării elementelor sistemului.

În literatura tehnică de specialitate din ultimul timp, se acordă un loc de seamă preocupării privitoare la stabilirea unor criterii de apreciere a calității tensiunii.

În acest scop, cercetătorii francezi au introdus noțiunea de iregularitate a tensiunii [1], care s-a dovedit o mărime capabilă să reflecte în mare măsură calitatea tensiunii. Lucrările teoretice și aplicative desfășurate apoi, au urmărit să precizeze [2], [3], [4] natura acestei mărimi și să găsească cele mai practice modalități de măsurare și introducere a ei în calculele privitoare la structura rețelelor [5], [6], [7], [8], [9].

Totuși, pînă în prezent, cercetările se concentrează în jurul naturii fizice și a fenomenelor legate de variațiile de tensiune, fără a aborda direct problema efectelor economice pe care le au variațiile de tensiune, deși indicii de calitate a tensiunii sînt permanent discutați tocmai sub aspectul măsurii în care ei sînt capabili să reflecte efectul economic al variațiilor tensiunii asupra consumatorilor.

Preocuparea pentru relevarea aspectului economic al indicilor de calitate se explică prin faptul că la optimizarea structurii și funcționării sistemului energetic este necesară confruntarea unei anumite investiții cu efectul economic general al îmbunătățirii calității energiei electrice livrate, care se obține datorită investiției făcute.

Efectele economice provocate de abaterile calității energiei electrice sînt complexe și se manifestă nu numai asupra consumatorilor ci și asupra sistemului energetic [10]. În prezentul articol, se studiază numai efectul economic provocat consumatorilor de variațiile tensiunii la care ei sînt alimentați.

2. VARIAȚIILE TENSIUNII

În fiecare punct al unei rețele tensiunea are o variație în timp $U(t)$, determinată de variațiile sarcinii consumatorilor și de circulația puterilor active și reactive în rețea. Dacă se examinează tensiunea $U(t)$ în diferite puncte ale rețelei, se poate constata că variațiile tensiunii își schimbă caracterul în timp și în funcție de punctul unde se face înregistrarea. Astfel, la orele de vîrf tensiunile oscilează în jurul valorilor minime, pe cînd la golul de noapte ele cresc, depășind chiar uneori 1,05 U_n (cît este limita admisă de norme). În unele zone ale rețelei, unde predomină consumatorii casnici, variațiile tensiunii sînt lente, iar în altele, prezența unor agregate industriale puternice cu regim discontinuu provoacă variații rapide ale tensiunii, ce se suprapun peste variațiile lente amintite mai sus. În cazuri speciale se semnalează efectul negativ al unor agregate cu acțiune periodică (compresoare, războaie, sudură) care determină apariția unor oscilații ale tensiunii cu frecvență de 0,5÷10 Hz supărătoare în special pentru iluminat. Acest din urmă aspect al variațiilor de tensiune — fenomenul de licărire — are o importanță tehnică de sine stătătoare iar măsurile pentru combaterea lui se studiază separat.

Se pune problema de a descrie, cu ajutorul cîtorva indici cantitativi, caracterul variațiilor de tensiune. Nivelul mediu pe intervalul de timp τ al tensiunii într-un anumit punct x este tensiunea medie $\overline{u}_x$

$$\overline{u}_x = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} u_x(t)\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

$\left(\text{în valori relative } u = \frac{U}{U_n}\right)$.

Acest indice poate caracteriza depărtarea electrică a punctului x de sursa de producere a puterii reactive ; dacă x este în apropierea acestei

surse, $\bar{u}_x > 1$, iar dacă el este mai îndepărtat, către extremitățile ramurilor rețelei, atunci $\bar{u}_x < 1$. În afară de aceasta, $\bar{u}_x$ caracterizează și echilibrul general al puterilor reactive în sistem; el scade atunci cînd sistemul nu dispune de rezervă suficientă.

Pentru caracterizarea variabilității tensiunii în jurul nivelului mediu de tensiune, se definește fluctuația tensiunii

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} [u_x(t) - \bar{u}_x]^2 \, dt. \tag{2}$$

Ținînd seama de faptul că toți receptorii electrici funcționează în regim optim la tensiunea nominală, este de mare interes exprimarea variabilității tensiunii față de tensiunea nominală. Pentru caracterizarea acestei variabilități se definesc mărimile

$$\bar{v}_x = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} [u_x(t) - 1] \, dt, \tag{3}$$

denumită abatere medie și

$$y_x = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} [u_x(t) - 1]^2 \, dt, \tag{4}$$

denumită iregularitate de P. Ailleret, care a introdus-o [1].

Între mărimile de mai sus, există relațiile

$$\begin{aligned} \bar{v}_x &= \bar{u}_x - 1, \\ y_x &= \bar{v}_x^2 + \sigma_x^2. \end{aligned} \tag{5}$$

În mod convențional, ponderînd valorile acestor indici din fiecare punct x cu puterile consumate în punctele respective se definesc următorii indici globali pe o porțiune de rețea:

— abaterea medie globală

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{\sum P_x \bar{v}_x^2}{\sum P_x}}; \tag{6}$$

— fluctuația globală

$$\sigma^2 = \frac{\sum P_x \sigma_x^2}{\sum P_x}; \tag{7}$$

— regularitatea medie globală

$$y = \bar{v}^2 + \sigma^2. \tag{8}$$

Indicii enumerați nu caracterizează pe deplin variațiile de tensiune; o caracterizare mai completă a acestora o poate da curba clasată a tensiunii în punctul x, $\theta_x(u_x^*)$ unde θ_x este durata cumulată relativă

$$\theta_x = \frac{\Theta_x}{\tau}, \tag{9}$$

Θ fiind durata cumulată în care tensiunea reală înregistrată $u_x(t)$ depășește valoarea u_x^*, pe intervalul de timp τ.

Derivata acestei curbe

$$\varphi_x(u_x^*) = \frac{d\theta_x}{du_x^*} \tag{10}$$

este densitatea probabilității de apariție a tensiunii u_x^*. Dacă tensiunea are repartiție normală, atunci curba clasată $\theta_x(u_x^*)$ și curba densității de probabilitate $\varphi_x(u_x^*)$ nu dau informații suplimentare față de indicii $\bar{u}_x$ și σ_x^2 (sau v_x și y_x) deoarece valorile acestora determină complet curba de repartiție. Se pune întrebarea în ce condiții se poate considera că curba de repartiție a valorilor momentane ale tensiunii este normală?

Fie o ramură a rețelei, alimentată de la un capăt la care se menține tensiunea constantă. Valorile tensiunii într-un punct oarecare x depind în acest caz numai de valorile sarcinii. S-a demonstrat că pentru ansambluri mari de consumatori, sarcina este o variabilă aleatoare cu repartiție normală [11]. Dacă se poate considera că această repartiție este valabilă pentru grupul consumatorilor alimentați din ramura respectivă a rețelei, atunci rezultă că și repartiția valorilor tensiunii este normală.

Această schematizare nu este pe deplin exactă din cel puțin două motive:

— sarcina depinde de valoarea tensiunii, astfel încît între tensiunea care se stabilește într-un punct al rețelei și puterea cerută*) de consumator nu este o relație strict liniară;

— dispozitivele de reglare a tensiunii nu mențin o valoare constantă în punctul de reglaj de la capătul de alimentare a ramurii considerate a rețelei ci doar limitează variațiile de tensiune într-o bandă determinată.

Măsura în care curba de repartiție reală a valorilor tensiunii diferă de curba normală se va putea aprecia, de la caz la caz, efectuînd măsurători corespunzătoare.

3. EFECTELE VARIAȚIILOR DE TENSIUNE ASUPRA CONSUMATORILOR

Comportarea diferitelor tipuri de receptoare electrice în funcție de variația tensiunii de alimentare este bine studiată, așa încît nu este necesar să fie reluată în prezentul articol. În literatură s-au prezentat [12], [13], [14], [15] efectele variației tensiunii asupra puterii, cuplului, turației uzurii și eficacității motoarelor electrice de diferite tipuri, a variației uzurii și eficacității cablurilor și transformatoarelor, a variației iluminatului etc.

De asemenea sînt bine conturate [10] efectele variațiilor de tensiune asupra agregatelor tehnologice, ținînd seama atît de comportarea receptoarelor electrice la variațiile tensiunii cît și de caracteristicile proceselor tehnologice în care intervin aceste receptoare.

*) Puterea cerută este acea sarcină care s-ar stabili dacă tensiunea s-ar menține permanent la valoarea nominală.

Rămîne însă de studiat efectul variațiilor de tensiune pe un ansamblu de agregate legate într-un proces tehnologic complex și de exprimat cantitativ daunele provocate.

În cadrul acestui studiu trebuie urmărită în mod deosebit apariția întreruperilor provocate de scăderea exagerată a tensiunii. Întreruperile pot fi declanșate fie de protecțiile electrice (relee de minimă tensiune, relee termice), fie de protecțiile tehnologice, la dereglarea procesului tehnologic (relee de presiune, temperatură, debit etc.). În cazul apariției întreruperilor, fenomenele care se amorsează în instalații și daunele care se produc, trebuie studiate în mod special potrivit metodei deja elaborate [16] și aplicate într-un număr de ramuri industriale.

Caracteristica daunelor provocate de variațiile tensiunii are deci două zone : prima se referă la regimurile de funcționare cu tensiune variabilă iar a doua se referă la efectul întreruperilor cauzate de scăderea exagerată a tensiunii. Punctul de discontinuitate (căderea de tensiune la care apare întreruperea) separă cele două zone ale caracteristicii daunelor determinate prin metode distincte.

Ca și în cazul metodei pentru determinarea daunelor provocate de întreruperi (care se utilizează în zona a doua), metoda pentru determinarea daunelor provocate de funcționarea agregatelor alimentate la tensiune variabilă (care se utilizează în prima zonă) trebuie să analizeze diferitele efecte economice, grupîndu-le în trei categorii :

— scăderea calității producției, rebuturi și consumuri suplimentare de materii prime sau energie ;
— uzură suplimentară, avarii și deranjamente ale utilajului ;
— micșorarea producției realizate.

Dintre acestea cele mai mari dificultăți le prezintă aprecierea cantitativă, valorică a efectului scăderii calității producției, deoarece scăderea calității nu este întotdeauna direct măsurabilă în unități naturale. Astfel, abaterile duratei și temperaturilor de încălzire la un cuptor de tratamente termice prin inducție, datorite variațiilor de tensiune, conduc la o scădere a calității pieselor tratate [17] care nu este direct vizibilă ci apare abia mai tîrziu, cînd piesele respective se uzează nejustificat de repede sau se rup la o suprasarcină obișnuită.

Totuși, se poate concepe o metodă generală de calcul a daunelor legate de scăderea calității produselor. Și anume, se ia în considerare faptul că scăderea calității înseamnă micșorarea valorii de întrebuințare și se calculează micșorarea proporțională a prețului de livrare a produselor respective. Uneori această operație este ușor de efectuat căci scăderea calității face ca produsele să fie încadrate într-un sort inferior, cu preț de livrare mai mic. În celelalte cazuri ea trebuie făcută alegînd un preț de livrare convențional, micșorat proporțional cu scăderea calității.

Dacă w_n este prețul de livrare normal (al produselor de bună calitate realizate cînd tensiunea se menține la valoarea nominală $u = 1$), iar $w(u)$ este prețul de livrare micșorat prin scăderea calității, la cea corespunzătoare valorii u a tensiunii, atunci dauna $d_c(u)$ datorită scăderii

calității la producția realizată într-o unitate de timp în care s-a menținut tensiunea u este

$$d_c(u) = p(u)[w_n - w(u)], \tag{11}$$

unde $p(u)$ este productivitatea întreprinderii la tensiunea u (în unități naturale : de exemplu t/h).

Consumurile suplimentare de materiale și energie, provocate de variațiile de tensiune provin în special din scăderea randamentelor; există însă și aspecte deosebite, cum ar fi de exemplu creșterea consumului de energie electrică pentru iluminat prin montarea unor lămpi suplimentare cu ajutorul cărora se restabilește iluminarea normală la tensiuni scăzute.

Dacă se notează diferite genuri de consumuri suplimentare cu $c_s(u)$ — în unități naturale — iar prețurile lor unitare se notează cu w_s, atunci daunele corespunzătoare consumurilor suplimentare pe unitatea de timp în care s-a menținut tensiunea u sînt

$$d_s(u) = \sum_s c_s(u) w_s. \tag{12}$$

Uzura mașinilor și aparatelor electrice depinde foarte mult de tensiunea sub care lucrează [12] și de gradul lor de încărcare*). Relațiile care dau creșterea uzurii la variația tensiunii sînt stabilite pentru fiecare tip de receptor în parte. Ținînd seama de aceste relații și de valoarea de investiție a utilajelor se pot stabili daunele corespunzătoare uzurilor suplimentare provocate de variațiile de tensiune.

Dacă uzura normală la tensiunea nominală are loc în timpul T iar uzura la o tensiune oarecare u este de z ori mai mare decît cea normală, înseamnă că valoarea uzurii suplimentare produse în unitatea de timp a utilajului j care funcționează la tensiunea u este

$$d_{zj}(u) = \frac{I_j}{T_j}[z_j(u) - 1], \tag{13}$$

unde I_j este valoarea de investiție a utilajului respectiv j (j = motoare asincrone, motoare sincrone, cuptoare, becuri, cabluri, transformatoare etc.). Daunele în unitatea de timp provocate de uzura suplimentară a utilajelor, la tensiunea u sînt

$$d_z(u) = \sum_j \frac{I_j}{T_j}[z_j(u) - 1]. \tag{14}$$

În daunele din a doua categorie se cuprind și cheltuielile suplimentare de întreținere și reparații necesare pentru menținerea în funcțiune a receptorilor afectați de variațiile de tensiune (costul manoperei și materialelor necesare pentru rebobinarea motoarelor, repararea rețelelor interioare de cabluri etc.).

*) E. Arie, S. Ionescu, P. Nicolae, Th. Miclescu, Șt. Kovacs, *Influența variațiilor de tensiune asupra productivității la uzinele „23 August" și „Republica"*. Academia R.P.R., Institutul de energetică, București, 1957.

Daunele în unitatea de timp corespunzătoare reparațiilor suplimentare au o formă asemănătoare celor corespunzătoare uzurii și anume:

$$d_r(u) = \sum_j r_j(u), \tag{15}$$

unde $r_j(u)$ este valoarea reparațiilor suplimentare, necesare pentru menținerea în funcție o unitate de timp a utilajelor j alimentate la tensiunea u.

A treia categorie de daune sînt cele proporționale cu scăderea producției. Aici se cuprind amortismentele, cheltuielile generale, salariile, precum și veniturile nete corespunzătoare cantității nefabricate.

Dacă productivitatea normală a întreprinderii sau secției studiate este p_n în unitatea de timp (de exemplu în tone/zi sau tone/oră) iar productivitatea la tensiunea u este $p(u)$ atunci daunele pe unitatea de timp corespunzătoare alimentării la tensiunea u sînt

$$d_p(u) = [p_n - p(u)](g + s + b), \tag{16}$$

unde g reprezintă componenta amortizărilor și cheltuielilor generale în prețul de cost al produsului (lei/t); s reprezintă componenta salariilor în prețul de cost al produsului (lei/t), iar b reprezintă beneficiul (egal cu diferența între prețul de livrare și prețul de cost al produsului). Componentele g, s, b sînt cele corespunzătoare funcționării normale a instalațiilor la $u = 1$.

4. DETERMINAREA DAUNELOR PROVOCATE DE VARIAȚIILE TENSIUNII LA UN CONSUMATOR INDUSTRIAL

Ca și în cazul determinării daunelor provocate de întreruperi electrice, determinarea daunelor provocate de variațiile de tensiune consumatorului industrial necesită studierea regimurilor procesului tehnologic, care apar la variația tensiunii. În acest scop, după ce se analizează comportarea fiecărui agregat în parte, este necesar să se studieze interdependența fenomenelor la diferite valori ale tensiunii, pentru a putea deduce comportarea ansamblului de instalații la fiecare valoare a tensiunii. În felul acesta, vor reieși punctele de strangulare care determină reducerea productivității întreprinderii precum și valoarea minimă u_{op} a tensiunii, care determină oprirea procesului de producție.

Pe baza acestor elemente devine posibil a se calcula daunele în unitatea de timp, corespunzătoare menținerii unei anumite valori a tensiunii $u > u_{op}$

$$d(u) = \sum_i d_i(u), \tag{17}$$

unde indicele i se referă la componentele daunelor examinate mai sus (11) — (16).

Se observă că fiecare din componentele $d_i(u)$ se poate pune sub forma unui produs între o constantă K_i depinzînd de mărimea agregatelor și o funcție de tensiune, $c_i(u)$,

$$d_i(u) = K_i\, c_i(u). \tag{18}$$

Daunele în unitatea de timp D ca valoare medie pe un interval mai lung, τ în care se cunosc variațiile de tensiune, sînt atunci

$$D = \int_{u_{op}}^{u_M} d(u)\, \varphi(u)\, du \tag{19}$$

unde $\varphi(u)$ este densitatea probabilității de apariție a tensiunii u (10) iar cu u_M s-a notat valoarea maximă la care este limitată tensiunea. Relația de mai sus se poate scrie și sub forma

$$D = D^- + D^+ = \int_{u_{op}}^{1} d(u)\, \varphi(u)\, du + \int_{1}^{u_M} d(u)\, \varphi(u)\, du, \tag{20}$$

unde D^- și D^+ sînt daunele corespunzătoare tensiunilor mai mici și respectiv mai mari decît cea nominală.

Repetînd calculele de mai sus de mai multe ori, se obțin mai multe valori D_a, D_b, ... corespunzătoare intervalelor τ_a, τ_b,... astfel alese încît valorile y_a, y_b, ... ale iregularității tensiunii să fie distincte. Cu aceste valori se poate trasa caracteristica daunelor în funcție de iregularitatea tensiunii în punctul considerat

$$D = f(y). \tag{21}$$

Problema alurii acestei funcții este foarte importantă, căci dacă dauna specifică A, definită ca

$$A = \frac{D}{y}, \tag{22}$$

ar fi constantă — așa cum presupune P. Ailleret — atunci ar fi posibilă o tratare foarte operativă a problemei daunelor, pe baza unor valori medii statistice, caracteristice principalelor tipuri de consumatori, după felul procesului tehnologic, gradul de automatizare, mărime etc.

Ținînd seama de relațiile (17), (18), (19) daunele se pot pune sub forma

$$D = \int_{u_{op}}^{u_M} \varphi(u) \sum_i d_i(u)\, du = \sum_i K_i \int_{u_{op}}^{u_M} c_i(u)\, \varphi(u)\, du, \tag{23}$$

unde K_i sînt constante iar $c_i(u)$ sînt funcțiile de tensiune care apar în expresiile componentelor daunelor (11) — (16). Făcînd în (23) schimbarea de variabilă (10) se obține expresia

$$D = \sum_i K_i \int_0^1 c_i(u)\, d\theta = \sum_i K_i \int_0^{\tau} c_i(u)\, dt, \tag{24}$$

din care se deduce că dacă funcțiile $c_i(u)$ sînt de forma

$$c_i(u) = K_i' (u - 1)^2, \tag{25}$$

unde K_i' sînt niște constante, atunci

$$A = \sum_i K_i K_i', \tag{26}$$

este o constantă.

Considerațiile teoretice [10], [12] permit ca pentru multe tipuri de receptoare să se deducă expresii pătratice de forma (25). Ipoteza că în ansamblu este valabilă proporționalitatea daunelor cu pătratul abaterii tensiunii, trebuie însă verificată prin efectuarea practică a calculelor după metoda de mai sus, care conduce la trasarea caracteristicii (21). Numai pe baza examinării unui număr suficient de asemenea caracteristici se va putea trage o concluzie asupra condițiilor în care este posibilă adoptarea ipotezei $A = \text{const}$.

De aceea considerăm necesară efectuarea de studii concrete, la întreprinderi cu diferite procese tehnologice, pentru trasarea caracteristicii daunelor după metoda expusă.

Pentru aplicarea metodei este necesară cunoașterea unei serii de elemente, printre care :

— regimul tensiunii, se poate obține prin instalarea la intrarea fiderilor în întreprinderea industrială a unui voltmetru înregistrator sau, mai bine, a unui aparat special care să înregistreze pe durata τ curba clasată a tensiunii ;

— receptoarele electrice din întreprindere, clasate pe categorii (motoare asincrone, motoare sincrone, motoare de curent continuu, cuptoare cu arc, cuptoare de inducție, lămpi electrice, agregate de sudură etc.) și date cu puterile lor, graficul de sarcină, rolul în procesul tehnologic ;

— schema de alimentare cu energie electrică a secțiilor și agregatelor din întreprindere trebuie să conțină elementele de protecție și automatizare, instalațiile de compensare a factorului de putere și mijloacele de reglare locală a tensiunii ;

— schema procesului tehnologic al întreprinderii, secțiilor și grupelor de agregate, cu indicarea capacităților de producție și a punctelor de strangulare ce apar în diferite regimuri de lucru, precum și cu indicarea mijloacelor de reglare a procesului tehnologic ;

— regimurile de lucru normale și fenomenele ce apar în agregatele tehnologice la variația tensiunii, la întreruperea alimentării cu energie electrică sau la întreruperea altor agenți de lucru ;

— structura prețului de cost al producției fabricate și detalii asupra valorii de investiție și duratei de viață a utilajelor.

În afară de aceasta trebuie să se cunoască — sau să se determine — caracteristicile daunelor provocate de întreruperi. Acestea folosesc nu numai direct, la aprecierea efectului întreruperilor, ci și la trasarea caracteristicii daunelor provocate de variațiile tensiunii, în domeniul valorilor $u < u_{op}$. Daunele totale pe unitatea de timp provocate unui consumator industrial de variațiile de tensiune și de întreruperi se pot scrie

$$D^* = D + D_{cp} + D_{\text{intr}}, \tag{27}$$

unde D sînt daunele (12) provocate de variațiile tensiunii la valori $u > u_{op}$ care nu conduc la oprirea procesului de producție ; D_{op} sînt daunele provocate de opririle procesului de producție cauzate de scăderea ten-

siunii sub valoarea critică u_{cp}, iar D_{intr} sînt daunele provocate de întreruperile alimentării cu energie electrică.

La un consumator cu proces tehnologic continuu și uniform există o singură formă a daunelor (27). Dacă însă consumatorul are un proces tehnologic cu mai multe faze ce se succed în timp, daunele (27) trebuie să fie calculate pentru fiecare fază în parte, întrucît efectele variațiilor tensiunii precum și ale întreruperilor pot fi mult diferite în funcție de faza în care se găsește procesul tehnologic.

Aplicarea în practică a metodei expuse va permite precizarea posibilităților de simplificare sau a necesității de a lua în considerare influența altor mărimi asupra daunelor provocate de variațiile tensiunii și de întreruperi.

5. DAUNELE PROVOCATE DE VARIAȚIILE TENSIUNII ÎNTR-O ZONĂ A REȚELEI

În paragraful precedent s-a arătat în ce condiții este posibil să se utilizeze iregularitatea tensiunii, y_x , introdusă de P. Ailleret, la exprimarea efectului economic al variației tensiunii asupra unui consumator industrial racordat în punctul x al rețelei.

Pentru o zonă de rețea, în fiecare punct de racordare a consumatorilor industriali, tensiunea are un anumit regim, caracterizat fie prin indicii v_x și y_x, fie prin curba clasată $\theta_x(u)$ sau prin densitatea de probabilitate $\varphi_x(u)$. Regimul tensiunii determină daunele D_x care depind de natura procesului tehnologic, mărimea întreprinderii, gradul de automatizare etc. Dacă se acceptă ipoteza $A = \text{const.}$, atunci se poate defini iregularitatea medie pe o porțiune de rețea

$$y = \frac{\sum A_x D_x}{\sum A_x}. \tag{28}$$

ca fiind acea valoare a iregularității care ar conduce la daunele totale prin înmulțire cu suma daunelor specifice. La rîndul lor daunele specifice A_x se pot pune sub forma

$$A_x = P_x a_x, \tag{29}$$

unde P_x reprezintă puterea consumată de consumatorul racordat în punctul x, iar a_x reprezintă daunele specifice unitare (în lei /kWh). Expresia iregularității medii

$$y = \frac{\sum a_x P_x y_x}{\sum a_x P_x} \tag{30}$$

revine la forma (8) sub care a fost definită de cercetătorii francezi, numai dacă se presupune că daunele specifice unitare a_x nu diferă de la un consumator la altul. Ni se pare că această ipoteză este prea restrictivă astfel încît iregularitatea medie sub forma (8) nu reprezintă un instrument practic de lucru trebuind să fie preferată forma (30) în care a_x sînt constante.

Determinarea acestor constante — dacă se va verifica ipoteza că într-adevăr $A = \text{const.}$ — este posibilă prin efectuarea unui număr de studii concrete de determinare a daunelor provocate de variațiile de tensiune, după metoda indicată în prezentul articol.

CONCLUZII

Exprimarea cantitativă a caracterului variațiilor tensiunii este posibilă cu ajutorul anumitor indici ca : abaterea medie $\bar{v}$, iregularitatea y, curba clasată $\theta(u)$ sau densitatea de probabilitate $\varphi(u)$, care nu indică efectul economic al variațiilor de tensiune asupra consumatorilor, dar pot fi folosite la determinarea lui.

Pentru determinarea efectului economic al variațiilor tensiunii, asupra consumatorilor este necesar să se stabilească forma funcțiilor de tensiune $c_i(u)$ din expresiile componentelor daunelor (11) — (16) pentru fiecare agregat în parte.

Dacă toate funcțiile $c_i(u)$ se pot aduce la o formă patratică (25) atunci daunele sînt proporționale cu iregularitatea tensiunii. În aceste condiții devine posibilă rezolvarea operativă a problemei daunelor, pe baza stabilirii unor valori medii statistice, ale daunelor specifice unitare, a_x, caracteristice principalelor tipuri de consumatori.

Precizarea condițiilor de valabilitate a proporționalității daunelor cu pătratul abaterii tensiunii este posibilă numai prin efectuarea unor studii concrete la anumiți consumatori tipici, după metoda de determinare a daunelor expusă în prezentul articol.

Aplicarea acestei metode cere să se studieze procesul tehnologic și regimurile sale la diferite valori ale tensiunii și să se stabilească astfel funcțiile $c_i(u)$ și componentele daunelor $d_i(u)$ care înmulțite cu densitatea probabilității de apariție a tensiunii u, dau valoarea reală a daunelor.

Prezentul articol atacă numai unul din aspectele economice legate de calitatea energiei electrice furnizate consumatorilor ; rezolvarea completă a problemei va fi însă posibilă numai prin tratarea în ansamblu a tuturor laturilor calitative ale energiei electrice precum : continuitatea, variația tensiunii și frecvenței, puritatea sinusoidei de tensiune, echilibrul fazelor etc. Pînă la o asemenea rezolvare trebuie să fie făcuți pași succesivi, atît pe plan teoretic cît și pe plan aplicativ, pentru precizarea mărimilor și relațiilor care intervin în cadrul realității industriale.

EVALUATION OF THE ECONOMIC EFFECT OF VOLTAGE VARIATION ON POWER CONSUMERS

ABSTRACT

A method for the evaluation of damages to industrial power consumers caused by voltage fluctuations is worked out. In the first part of the paper the indexes are defined by means of which the voltage fluctua-

tions may be expressed quantitatively. The damages are next analysed and classified into the following three groups :

— determination of the quality of products, rejects an additional consumption of raw materials and power ;

— additional wear, damages and equipment out of order ;

— reduction of output.

Further, the conditions are examined under which it becomes possible to apply a simplified treatment of the problem by the consideration of average values of specific damages to different classes of power consumers.

It is finally concluded that studies on actual cases carried out according to the method expounded are yet required, in order to ascertain the validity range of the simplifying assumptions which have been examined.

BIBLIOGRAFIE

1. P. AILLERET, *L'introduction de la mesure dans la notion de la qualité du service d'une distribution d'électricité et son intérêt au point de vue de la conception des réseaux.* Bulletin de la Société Française des Electriciens, ian., **VI**, *7*, 61 (1956).
2. FR. CAHEN, *Les aspects modernes de la distribution de l'électricité. La notion de la qualité du service.* Bulletin AIM, *12*, dec., **69**, 779—806 (1956).
3. P. GAUSSENS, *La distribution de l'énergie électrique. Evaluation de sa qualité. Les moyens de l'améliorer.* Electricité, ian., *234* (1957).
4. — *Réglage des fluctuations aléatoires de tension dans les réseaux électriques.* Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, **50**, *26*, 1271—1279 (1959).
5. В. А. ВЕНИКОВ, Л. А. СОЛДАТКИНА, *К вопросу о критериях качества электроэнергии и качества автоматического регулирования режима электросистем.* Электричество, **12**, 21—25 (1959).
6. Н. К. АРХИПОВ, *О количественной оценке качества напряжения.* Электричество, **12**, 26—27 (1959).
7. Ф. Ф. КАРПОВ, *Количественная оценка качества напряжения в распределительной сети.* Электричество, *1*, 16—21 (1962).
8. Н. А. МЕЛЬНИКОВ, *Регулирование напряжения в электросистемах и повышение качества электрической энергии.* Электричество, *8*, 9—18 (1962).
9. И. С. БЕССМЕРТНЫЙ, *О качестве энергии и регулировании напряжения в городских электрических сетях.* Электричество, *10*, 21—26 (1962).
10. E. ARIE, C. GUȚU, M. PETCU, *Incidența continuității serviciului și rigidității parametrilor energiei electrice în problema dimensionării rezervei de putere.* St. cerc. energ., *4* (1963).
11. MIHAI PETCU, *Sistem de indici pentru descrierea curbelor de sarcină.* St. și cerc. de energ., **X**, *3*, 481—497 (1960).
12. C. PENESCU, *Efectul variațiilor de tensiune și frecvență asupra regimului de funcționare al consumatorilor.* Conferința Electricienilor din R.P.R., ASIT, OPED, București, 1957.
13. JERZY KOTARBA, *Wrahliwosc odbiornikow na odchylenia napiecia.* Energetyka przemyslowa, **X**, *1*, 12—18, Varșovia (1962).
14. A. STRASZEWSKI, *Uwagi do artykulu mgr. inz. Jerzego Kotarby pt. Wrazliwosc odbiornikow na zmiane napiecia.* Energetyka przemyslowa, **X**, *1*, 19, Varșovia (1962).
15. ANDREY WASOWSKI, *Dopuszczalne wahania napiecia i ich czestosk.* Energetyka przemyslowa, **X**, *1*, 7—12, Varșovia (1962).
16. C. GUȚU, M. PETCU, A. SOCI, *Determinarea daunelor provocate de întreruperea alimentării cu energie electrică.* St. cerc. energ., **XI**, *4*, 613—625 (1961).
17. Б. А. КОНСТАНТИНОВ, *О качестве напряжения на промышленных предприятиях.* Электричество, *5*, 1—5 (1963).

SOLUȚIA PROBLEMEI PIERDERILOR ÎN REȚELELE ELECTRICE CU AJUTORUL ECHIVALENTULUI REI A „ANALIZEI NODALE" ASOCIAT UNUI CALCULATOR NUMERIC

DE

PAUL DIMO

MEMBRU CORESPONDENT AL ACADEMIEI R.P.R.

621.316.1.017.21 : 621.372 : 518.5

I. FORMAREA ECHIVALENTULUI REI AL SISTEMULUI CU SARCINĂ UNICĂ

Reamintim din studiul precedent [1] procedeul de formare al echivalentului REI al sistemului cu sarcină unică (fig. 1):

1. Nodurile cu sarcini ($K + 1$; $K + 2$ ...) sînt „liniarizate" prin adăugarea admitanțelor $\overline{Y}_1 = \frac{1}{Z_1}$; $\overline{Y}_2 = \frac{1}{Z_2}$ etc. ($\overline{Y}_1$, $\overline{Y}_2$ notații pe schema din fig. 1), aceste admitanțe reproduc sarcinile traversate de curenții respectivi I_{k+1}, I_{k+2} ...

Matricea (Y) se completează, prin adăugarea la termenii diagonali a admitanțelor noi.

2. Nodul 0 astfel format se detașează de pămînt. I se adaugă în serie ca în figura 2 o admitanță $\overline{Y}_e = \frac{1}{Z_e}$ (negativă) care traversată de curentul total I_e (suma vectorială a curenților generatorilor); să anuleze efectul primei serii de admitanțe adăugate, adică să reproducă sarcina totală cu semn schimbat

$$Z_e |I_e|^2 = \sum Z_i |I_{k+i}|^2, \tag{1}$$

cu $i = 1, 2, \ldots, n$.

Prin aceasta matricea $[Y]$ se transformă iar prin adăugarea a două rînduri și două coloane corespunzătoare nodurilor 0 și e.

3. Se procedează apoi la eliminarea pe rînd a nodurilor de sarcină $K+1$, $K+2$, ... și a nodului 0 fost pămînt (cu formula (1), pentru nodul i de exemplu)

$$y_{mn} \text{ nou} = y_{mn} \text{ vechi} - \frac{Y_{mi} \cdot y_{ni}}{y_{ii}} . \tag{1}$$

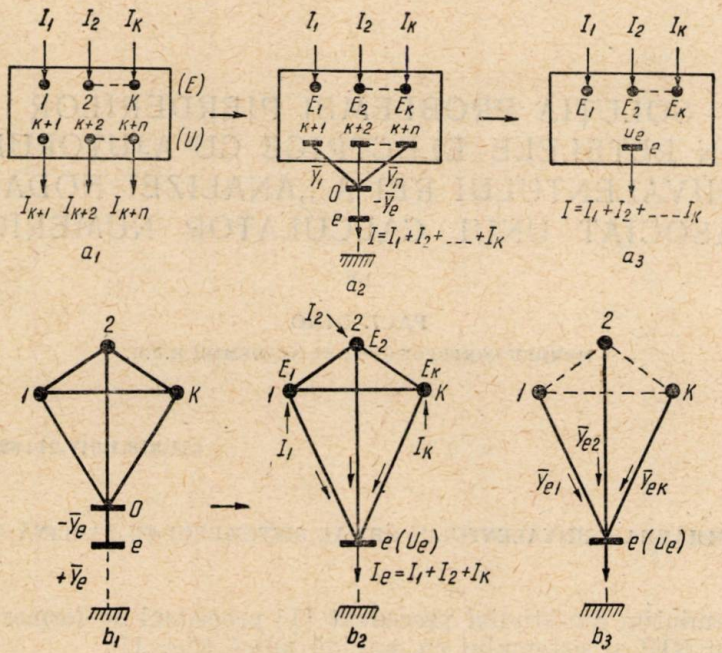


Fig. 1. — Formarea echivalentului REI cu sarcină unică.
a_1, a_2, a_3 = formarea pornind de la rețeaua reală căreia i se adaugă admitanțele $\overline{Y}_1$, $\overline{Y}_2$ ... $\overline{Y}_n$ și în serie cu acestea — $\overline{Y}_e$ ca în fig. a_2.
b_1, b_2, b_3 = formarea pornind de la echivalentul final al sistemului căruia i se adaugă admitanțe — $\overline{Y}_e$ ca în fig. b_1.

Se ajunge la ecuația matricială care exprimă în mod unitar echivalentul REI al sistemului cu sarcină unică (fig. 1 *b* 2). În cazul a 3 generatoare este :

$$\begin{array}{c|c} & \\ 1 & I_1 \\ 2 & I_2 \\ 3 & I_3 \\ e & I_e \end{array} = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & e \\ 1 & y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{1e} \\ 2 & y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{2e} \\ 3 & y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{3e} \\ e & y_{e1} & y_{e2} & y_{e3} & y_{ee} \end{array} \times \begin{array}{|c|} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ U_e \end{array} \tag{2}$$

coeficienții y_{mn} sînt chiar admitanțele respective ale schemei. Astfel $y_{e1} = \overline{Y}_{e1}$; $y_{e2} = \overline{Y}_{e2}$ din figura 1, iar termenul diagonal este suma celor nediagonali cu semn schimbat. Admitanța notată de noi $\overline{Y}_{is}$ în echivalentul sistemului (vezi fig. 2) este zero în toate nodurile, sarcina fiind toată concentrată în nodul e. Ea este reprezentată integral de curentul I_e (vezi studiul anterior).

Din figura 2 comparată cu figura 1 se vede diferența dintre echivalentul cu sarcină unică și echivalentele obișnuite.

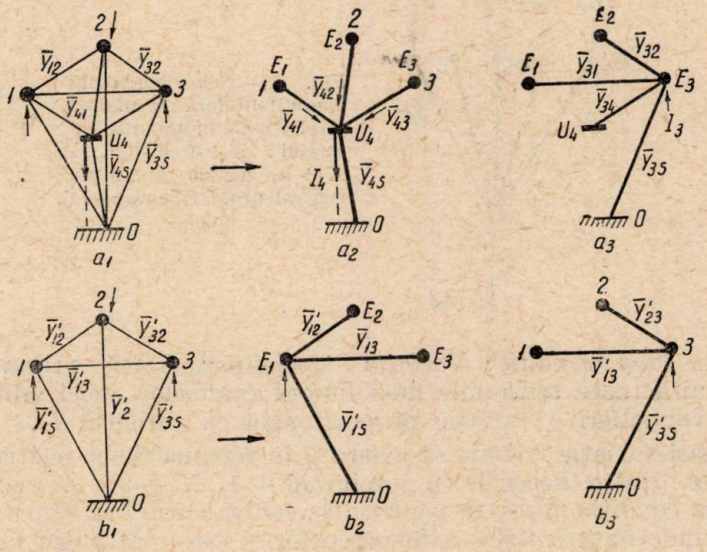


Fig. 2.

a_1 = echivalentul sistemului cu nodul 4 păstrat.
a_2 = schema REI a nodului 4, „extrasă" din acest echivalent — a_3 = idem, a nodului 3.
b_1 = echivalentul final.
b_2, b_3 = scheme REI extrase din echivalentul final. De observat: Echivalentul cu sarcină unică este identic cu echivalentul a_1 cu nodul e, corespunzînd nodului 4 dar cu admitanțele $\overline{Y}_{1s}$, $\overline{Y}_{2s}$, $\overline{Y}_{3s}$ și $\overline{Y}_{4s}$, echivalente sarcinilor, egale toate cu zero, sarcinile fiind introduse toate în curentul $I_e = I_4$.

II. PROPRIETĂȚILE ECHIVALENTULUI REI CU SARCINĂ UNICĂ

Să stabilim condițiile în care echivalentul REI dedus dintr-un prim regim rămîne valabil și pentru alte regimuri în care curenții generatorilor și curentul total I_e sînt schimbați.

a. *Prima condiție: Variația „conformă" a curenților de sarcină.* Dacă curenții de sarcină păstrează un raport constant l_{k+1}, l_{k+2} ... față de curentul total I_e, atunci admitanțele adăugate își anulează

mai departe efectul. În adevăr relația (1) devine

$$Z_e |I_e|^2 = \sum_i Z_i |l_i|^2 |I_e|^2, \tag{3}$$

$$Z_e = \sum_i Z_i |l_i|^2, \tag{4}$$

condiția (1) de anulare a efectului admitanțelor nu mai depinde de curentul I_e.

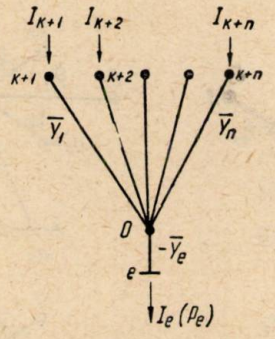


Fig. 3. — Schema radială a admitanțelor ce se adaugă rețelei reale în nodurile cu sarcini : $K+1$, $K+2$ ... $K+n$, pentru a obține echivalentul REI cu sarcină unică.

b. *A doua condiție: Variația tensiunilor.* Dacă prima condiție a. e împlinită toate tensiunile de-a lungul ramurilor stelei admitanțelor adăugate vor suferi o variație proporțională cu curentul I_e.

Aceeași variație trebuie să existe și în rețeaua reală pentru căderile de tensiuni dintre nodurile cu sarcini $K+1$, $K+2$ ... etc. Aceasta este a doua condiție necesară pentru ca „echivalentul" să rămînă riguros. Ea corespunde naturii fizice a fenomenelor și este mai puțin importantă ca prima deoarece :

— Tensiunile nodale rămîn libere ca nivel față de pămînt pentru nodurile cu sarcină. Numai căderile de tensiune dintre noduri sînt afectate, căderi care capătă o variație proporțională cu curenții în diversele ramuri. Acești curenți variază în general în sensul variației curenților sarcinii totale I_e, mai ales dacă condiția primă e respectată.

Condiția principală rămîne prima (a), adică aceea a „conformismului" curentului cu curentul total I_e. Această condiție este însă considerată curent în formarea unui nod unic al sarcinii și putem afirma că este încetățenită azi în analiza sistemelor [4].

În condițiile de mai sus echivalentul REI dedus dintr-un regim reproduce în ramurile sale pierderi de putere identice cu cele ale rețelei reale în orice alt regim.

c. *Adaptabilitate la transformările de structură.* În afară de proprietățile conservative pentru pierderi echivalentul REI al sistemului are calitatea de a putea fi adaptat cu ușurință în cazul schimbărilor de structură. Astfel :

— O linie nouă adăugată sau suprimată în rețeaua reală se operează adăugînd sau suprimînd impedanța respectivă dintre nodurile echivalen-

tului. Nodurile respective trebuie reținute în echivalent. Dacă au fost reduse, se reconstituie matricea și cu cele două noduri, se adaugă admitanța și se reduce iar. În acest din urmă caz, este de recomandat ca nodurile respective să fi fost lăsate ultimele în procesul de reducere pentru reducerea operațiilor.

— Un autotransformator, se introduce ca un „pi" echivalent, cu două picioare în două noduri învecinate. Rezultă posibilități comode de studiu, prin considerarea acelor noduri fie ca noduri cu sarcini (conforme), fie ca noduri generatoare negative (sarcini neconforme).

★

Calitățile de mai sus dau acestui echivalent largi posibilități.

În cele de mai jos ne vom ocupa numai de problema pierderilor. Se presupun cunoscute metodele principale din literatură ([4], [5], [6] etc.).

III. SOLUȚII BAZATE PE MATRICEA [Z] INSPIRATE DIN SOLUȚII CUNOSCUTE

În stadiul actual al tehnicii sînt utilizate următoarele categorii de metode pentru studiu :

— Metode de studiu direct al rețelei reale (fără consumator echivalent) prin care se găsesc condiții optimale de funcționare în care sînt considerate și pierderile.

— Metode de determinare a pierderilor cu formule de tipul cu coeficienți constanți

$$\Pi = \sum \sum B_{mn} P_m P_n + \sum B_n P_n + B_0, \tag{5}$$

sau de tipul simplificat

$$\Pi = \sum \sum B_{mn} P_m P_n. \tag{6}$$

— Metode de determinare directă a coeficienților de creșteri relative a pierderilor la centrale

$$\sigma_n = \frac{\partial \Pi}{\partial P_n}. \tag{7}$$

Cu notațiile : P_m, P_n puterile centralelor m, n ; Π pierderile totale. În general, sînt utilizate formule de tipul 5, 6 și 7 pentru determinarea cărora se fac aproximații mari, contrazicînd în general legile fizice de transformare a regimurilor, din cauza complexității problemei.

În general, se utilizează ecuații de tipul : $[V] = [Z]. [I]$ care sînt mai comode matematic prin stabilirea unor dependențe liniare între curenți și puteri. O primă soluție, inspirată din metodele cunoscute este utilizarea mai departe a matricei $[Z]$.

Pentru aceasta, o dată ajunși la echivalentul final din figura 4 *a* reprezentat unitar de ecuația matriceală (2) se determină ecuațiile corespunzătoare de tipul

$$[V] = [Z] \cdot [I], \tag{8}$$

$[V]$ sînt căderile de tensiune $E - U_e$, adică tensiunile generatoarelor cu nod de referință nodul echivalent e. Matricea $[Z]$ se deduce astfel :

— Facem $U_e = 0$ în ecuația (2), ceea ce înseamnă că tăiem rîndul și linia nodului e. Ecuațiile rămase determină complet sistemul. E_1, E_2, E_3 rămași în ecuație devin chiar căderile de tensiune V_1, V_2, V_3 căutate, deoarece nodul e a fost legat direct la pămînt ($U_e = 0$).

— Inversăm matricea $[Y]$ ce a rezultat și găsim matricea $[Z]$ din ecuația (8).

— Odată obținută matricea $[Z]$ se înmulțește fiecare cădere de tensiune V, cu curentul conjugat respectiv ce intră în nod.

— Se exprimă în diverse ipoteze simplificatoare curenții, funcție de puteri și se deduc în diverse variante, formule de tipul (5) sau (6) [2], [4], [6].

IV. STRUCTURA LEGILOR DE VARIAȚIE A PIERDERILOR ÎN RAMURILE ECHIVALENTULUI

Se pot deduce soluții cu aspect cu totul nou din studiul evoluției pierderilor în ramurile echivalentului.

Echivalentul se reprezintă (fig. 4 *b*) pentru mai multă claritate ca o singură schemă radială a nodului echivalent e, căreia i se adaugă ramuri laterale (punctat). Există o diferență de natură fizică între ramurile radiale ale nodului e, care alimentează direct sarcina la unul din capete și ramurile laterale ce leagă între ele puncte de injecție.

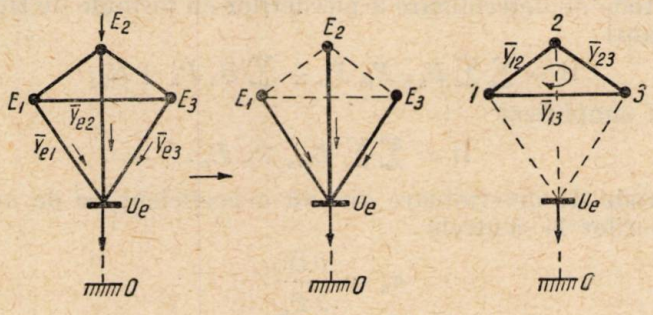


Fig. 4.

a) Echivalentul REI cu sarcină unică (cazul particular a 3 generatoare).

b) Schema REI a nodului e — Ramurile laterale punctate sînt restul laturilor echivalentului — poate fi considerat și ca :
— Schema REI a nodului e plus
— Ramuri laterale între nodurile generatoarelor.

c) Puterea ce ar circula în cerc prin ramurile echivalentului, ca în bucla 1, 2, 3 fără a alimenta sarcina e, poate indica o structură proastă sau un reglaj dezavantajos căci prilejuiește pierderi parazite.

Se stabilesc legi de variație a pierderilor în ramurile radiale ale schemei REI a nodului e și în cele laterale, funcție de puterile injectate și se deduc formule de pierderi.

1. LEGI DE VARIAȚIE PENTRU RAMURILE RADIALE CE ALIMENTEAZĂ DIRECT SARCINA (P_e)

Legile de variație ce stabilim trebuie să corespundă la structuri de tipul unor sume de termeni rezultați din înmulțirea unor constante cu puterile generatoarelor așa cum apar în formula (5) sau (6). Să înșirăm în ordine de la aproximativ către exact tipul de structuri ce pot fi considerate :

— *Structura 1 cu o constantă* pe ramură

Pierderile pe ramura $i-k$ se exprimă :

$$p_{ik} = B_{ik} \cdot P_i \cdot P_k. \tag{9}$$

Aceasta este cea mai simplă structură ce poate fi considerată și poate fi aplicată atît ramurilor radiale cît și celor laterale. Este aproximativă căci consideră numai termenul C'_{ie-ki} din formula (13) de mai jos [3].

Totuși, chiar o asemenea formulă dă în multe cazuri indicații prețioase, după cum se vede din tabela 1 în coloana 7.

— *Structura 2 — cu 2 constante*

Se aplică numai pentru un curent total constant al sarcinii căreia îi corespunde o putere totală P_e. Presupunem că cota parte dată de curentul generatorului i, rămîne proporțional pe ramură cu puterea P_i, scriem pentru ramura $i-e$ de exemplu

$$p_{ie} = R_{ie} [A P_i + B (P_e - P_i)]^2, \tag{10}$$

A și B sînt cele două constante iar R_{ie} este rezistența ramurii. Această relație consideră pentru legea de repartiție a curenților în ramura $i-e$, curentul total I_e (P_e) și curentul I_i (P_i). Dacă dezvoltăm ajungem la structura cu 3 constante

$$p_{ie} = A'_{ie} P_i^2 + B'_{ie} P_i + D'_{ie}. \tag{11}$$

În A'_{ie}, B'_{ie} și D'_{ie} fiind cuprinsă influența rezistenței R_{ie}.

— *Structura 3, cu 3 sau mai multe constante*

În această structură se exprimă explicit toate puterile injectate pentru care schema REI dă indicații că ele au importanță pe ramura respectivă; în general, puterile mari injectate în apropierea nodurilor ramurii respective. Această apropiere apare clar pe echivalent din examinarea admitanțelor și a circulațiilor. Astfel dacă puterea din nodul K trebuie să apară cu un coeficient de repartiție separat atunci trebuie considerați trei curenți care se suprapun în loc de doi curenți adică :

primul curent datorit puterii P_i . . . . . $A P_i$
al doilea datorit puterii P_k . . . . . $B P_k$
al treilea datorit restului puterilor . . . . $C (P_e - P_i - P_k)$.

Pierderea de putere pe ramura ie este dată de formula

$$p_{ie} = R_{ie} [A P_i + B P_k + C (P_e - P_i - P_k)]^2, \tag{12}$$

cu 3 constante A, B și C.

Structura formulei de pierderi rezultă cu P_e constant și rezistența R_{ie} introdusă în constante

$$p_{ie} = A'_{ie-i} P_i^2 + B'_{ie-i} P_i + A'_{ie-k} P_k^2 + B'_{ie-k} P_k + C'_{ie-ki} P_i P_k + D'_{ie}. \quad (13)$$

Se poate observa că fiecare centrală în plus considerată adaugă cîte o nouă constantă în formulele de tipul (12) și schimbă structura formulei (13) adăugînd o serie de noi termeni și constante după puterile ce se ordonează ca în formula (5).

— *Structura 4 — cu constante în plus pentru puterea reactivă injectată în noduri*

Dacă se consideră o variație liberă a unor injecții de puteri reactive, care nu pot fi exprimate prin nici o dependență liniară de puterile active se pot adăuga termeni speciali. Nu ne vom ocupa deocamdată de acest caz care își găsește soluții identice.

2. LEGILE DE VARIAȚIE PE RAMURILE LATERALE

Pentru aceste ramuri este mai nimerită structura 3 sau 1 în care se mențin explicit cele două puteri de la capetele ramurii.

3. MODUL DE STABILIRE AL FORMULELOR DE PIERDERI CU COEFICIENȚI CONSTANȚI (B) DIN CONSIDERAREA STRUCTURII VARIAȚIEI PIERDERILOR LOCALIZATE ÎN RAMURI

Dacă formulele de pierderi au fost stabilite pe ramuri, formula finală de pierderi (5) sau (6) se stabilește adunînd termenii toți proveniți din termeni de aceeași constituție : $A\ P_i^2$, $B\ P_i$, $C\ P_i \cdot P_k$ etc., ordonați pe categorii, după puteri ca în formula (5). Odată obținut un termen unic de o categorie de exemplu $A_{\text{total}} \cdot P_i^2$, deducem : $A_{\text{total}} = B_{ii} \ldots$ etc.

Coeficienții puterilor, pe fiecare ramură se stabilesc din pierderile localizate în ramura respectivă determinate într-un număr de regimuri corespunzător numărului constantelor ce au rezultat din structura considerată. Regimurile necesare pot fi determinate :

— Pe echivalentul REI al regimului de bază dacă sînt indicați că el rămîne valabil (sarcină conformă etc., vezi mai sus).

— Pe un număr de regimuri noi, pentru care se stabilesc echivalente numai dacă este necesar, ceea ce conduce la o dozare a aproximațiilor.

V. SOLUȚIILE ÎN ORDINEA EXACTITĂȚII DE TIPUL : $\Pi = \Sigma\Sigma\, B_{mn}\, P_m\, P_n$ sau $\Pi = \Sigma\Sigma\, B_{mn}\, P_m\, P_n + \Sigma B_n\, P_n + B_e$

Reținem următoarele categorii :

1) *Soluția 1 cu o constantă pe ramură cu calcul redus* pentru un palier de putere (P_e = const.) cu determinarea unui singur regim pe rețeaua reală. Această soluție presupune aplicarea structurii 1, și a fost arătată într-un studiu anterior [3].

Coeficienții puterilor se deduc imediat din valoarea pierderilor pe ramuri împărțite la produsul puterilor respective din regimul de bază [3]. Calculul necesar este cu totul redus. Formula trebuie utilizată numai pentru variații procentuale mici ale puterilor.

2) *Soluția 2 cu două constante pe ramuri cu calcul redus cu determinarea unui singur regim cu un echivalent REI pe rețeaua reală și a încă 1 regim numai pe echivalentul REI.* Se procedează astfel:

a) Se determină regimul de bază și i se întocmește echivalentul REI cu sarcină unică. Se determină pierderile pe fiecare ramură.

b) Se calculează un al doilea regim pe echivalentul REI. Se determină și pentru acest regim pierderile pe fiecare ramură.

c) Egalînd în cele două regimuri pierderile cu cele rezultate din formula (10), se obțin pe fiecare ramură două ecuații cu două necunoscute din care se determină cele două constante. Se dezvoltă și se grupează termenii conform formulei (11), din care se obține prin adunarea termenilor formula finală.

3) *Soluția 3 cu 3 constante, cu calcul redus, idem cu soluția 2 dar cu determinarea a 2 regimuri pe echivalent*

a) Raționînd pe echivalent și pe imaginea nodului central se alege pentru fiecare nod încă o centrală apropiată pentru a fi considerată în formula (12) (P_k), cu 3 constante. Pentru ramurile laterale cele două puteri din formula (12) sînt ale celor două injecții de la capetele ramurii.

b) Se determină apoi pe echivalent încă două regimuri în afară de cel de bază și se scriu 3 ecuații de gradul 1 cu 3 necunoscute pentru fiecare regim și ramură, exprimînd pierderile cu formula (12). Se deduc coeficienții A, B, C. Constantele sînt apoi grupate și adunate după puteri ca în formula (13), obținîndu-se coeficienții B.

Se obține o formulă de tipul formulei (5).

4) *Soluția 4 cu corecții succesive și calcul redus pentru o sarcină totală variind între 2 paliere date, cu utilizarea unui singur echivalent REI și a încă 2 regimuri de verificare pe rețeaua reală pe 2 paliere cu puteri învecinate.*

a) Se împarte intervalul de puteri totale (P_e) dorit în 6 părți și se consideră 3 trepte de putere după cum urmează:

— 1 treaptă în mijlocul intervalului,
— 1 treaptă superioară pe penultima treaptă în sus,
— 1 treaptă inferioară pe penultima treaptă în jos.

b) Se determină pentru treapta centrală prin soluția (3) de mai sus o formulă cu coeficienți B de tipul (5).

c) Se calculează apoi pe rețeaua reală regimurile pe treptele superioară și inferioară și se stabilesc diferențele de pierderi între formula stabilită și situația reală.

Se observă din formula (12) că termenul P_e considerat constant intră exclusiv în componența termenilor care înmulțesc puteri simple

(B'_{ie-i} sau B_{ie-k} în formula (13)) sau în constantă (D'_{ie} din formula (13)). Trebuie deci corectați numai termenii B_n și constanta generală B_0 a formulei (5) dacă pierderile date de prima formulă nu apar exacte din regimurile de verificare.

Pentru aceasta procedăm astfel :

Înmulțim toți termenii de tipul B_n cu termenul de corecție

$$C_1 = 1 - c_1 (P_{e\,\text{nou}} - P_{e\,\text{bază}}). \tag{14}$$

Constanta B_0 o înmulțim de asemenea cu termenul de corecție.

$$C_2 = 1 - c_2 (P_{e\,\text{nou}} - P_{e\,\text{bază}}).$$

Coeficienții B astfel corijați se introduc în formula de pierderi cu c_1 și c_2 explicit și se egalează expresia pierderilor totale obținută astfel, cu pierderile reale pentru cele două regimuri noi. Se obțin două ecuații liniare de gradul 1 cu două necunoscute : c_1 și c_2.

O dată necunoscutele determinate, se explicitează termenul $P_{e\,\text{nou}} = \sum P$ și se grupează toți termenii ce rezultă după puteri, așa cum apar în formula (5). Se obține o nouă formulă cu coeficienți B corijați care :

— Verifică riguros cele două regimuri noi cu puteri totale diferite.

— Verifică riguros primul regim de bază din care s-a dedus echivalentul.

Această soluție este prima soluție recomandabilă în cazul cînd se dorește determinarea paralelă a coeficienților σ de creșteri relative a pierderilor pe centrale deoarece :

— Este exactă în cazurile generale în care sistemul cercetat permite o formulă de pierderi de tipul (5) sau (6) ce presupune că curenții sînt proporționali cu puterile active $\left(\frac{Q}{P} = \text{const. sau } \frac{\Delta P}{\Delta Q} = \text{const.}\right.$ pentru curenții injectați, sarcinile sînt conforme, nu intervin reglaje de autotransformatori ... etc ... etc).

— Calculul este redus, în comparație cu formule similare din literatura tehnică necesitînd numai determinarea unui singur regim de bază cu reducere la un echivalent și determinarea a încă două regimuri de verificare. În general, orice formulă de pierderi trebuie controlată prin cîteva regimuri de verificare, care aici sînt utilizate chiar la corijarea coeficienților formulei de pierderi, fiind introduse ca o completare a calculului și numai dacă se dovedește necesar (verificarea nu dă rezultate).

— Permite un raționament paralel cu calculul, pe echivalent și imaginea nodului central e (vezi anexa). Acest raționament orientează stabilirea tipului formulei de pierderi și permite și cercetări în legătură cu structura sistemului. Dăm ca singur exemplu determinarea circulațiilor parazite de puteri, care pot apare în echivalent ca în figura 4 *c* și care cîteodată indică o structură sau un reglaj necorespunzător.

— Este verificată pe mai multe paliere de puteri și poate fi utilizată pentru coeficienții σ.

5) *Soluția 5 cu dozarea aproximațiilor în cazul cînd natura regimurilor nu permite extinderea aplicării echivalentului REI.*

Dacă în soluția (4) de mai sus regimurile calculate pe echivalent pe primul palier de putere dau diferențe nepermise față de regimuri reale, rezultă că nu sînt împlinite condițiile fizice pentru menținerea echivalentului (conformismul sarcinii, legi liniare de variație a puterii reactive, autotransformatoare etc.). Într-un asemenea caz se procedează mai departe în același fel ca la soluția (4), utilizîndu-se și noile regimuri cu care s-a făcut verificarea, introducîndu-le în calcul. Determinăm încă două echivalente REI pentru aceste două regimuri și calculăm pierderile pe fiecare ramură în parte. Presupunem că rezistențele pe ramuri în cele 3 echivalente sînt diferite, deoarece în caz contrar echivalentul era aplicabil. Vom obține pentru fiecare ramură în parte cîte 3 valori de pierderi corespunzătoare celor 3 regimuri. Putem utiliza acum structura (2) dar cu formula finală (11) cu 3 termeni, deoarece rezistențele pe ramuri nu rămîn constante. Vom recalcula coeficienții noi ai puterilor numai pentru ramurile în care observăm diferențe între calculele cu formula veche și cele reale.

Rezultă 3 ecuații cu 3 necunoscute pentru aceste ramuri egalînd expresiile 11 pentru cele 3 regimuri (cel de bază + 2) cu pierderile corespunzătoare. Pe ramurile laterale lăsăm lucrurile neschimbate, în cazul cînd pierderile totale însumate pe aceste ramuri cu formula veche corespund cu valoarea pierderilor din ramurile laterale pe noile echivalente cu diferențe mici.

Astfel, cu noii termeni deduși pentru o parte din ramurile în care a fost necesar, stabilim valorile coeficienților B utilizînd și toate rezultatele primului calcul pe restul ramurilor și stabilim noua formulă de pierderi pentru palierul central. Pentru alte două paliere de puteri se procedează identic ca în primul caz.

Dacă nici cu acești noi termeni nu se poate obține o aproximație suficientă, se va trece la treapta următoare utilizînd structura 3, care pentru cazul cînd echivalentul REI nu se menține (R_e din formula (12) nu este constant) conduce la o structură cu 6 termeni și deci cu 6 constante pe ramură pentru toate ramurile, conform formulei (13). Rezultă necesitatea de a determina pentru primul palier 6 echivalente REI pentru 6 situații diferite, se obține astfel la fel ca mai sus, pe ramurile în care verificarea dă rezultate diferite față de formula veche, 6 ecuații cu 6 necunoscute din care deducem coeficienții și stabilim formula de pierderi.

Se observă analizînd formula (13), că ramurile în care se consideră aceleași două centrale cum este de multe ori cazul (vezi fig. 5) conduc împreună la o singură ecuație de tipul (13); ecuațiile pot fi deci reduse ca număr și din observații de acest fel.

Acest ultim procedeu, pe care îl socotim utilizabil în cazurile cele mai rebele conduce totuși la calcule relativ reduse și anume:

— determinarea a 6 regimuri de verificare pe primul palier al puterii totale;

— determinarea a două regimuri de verificare pe încă două paliere ;
— determinarea coeficienților pe ramuri.

Numărul de ecuații necesare se reduce prin gruparea a 2...3 ramuri în ecuații unice și prin eliminarea ramurilor care conduc la diferențe mici față de formula precedentă încercată. Pe aceste ramuri se păstrează mai departe formulele vechi cu coeficienții deja determinați.

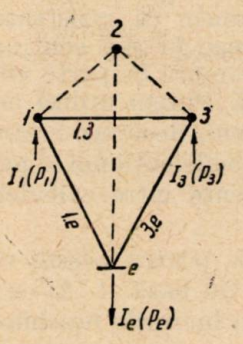


Fig. 5. — Cele 3 ramuri 1.*e*, 1.3 și 3.*e*, în cazul unei legături relativ slabe 1.3 pot fi integrate în legi de repartiție pentru curent provenind din 3 sume : P_1, P_3 și $(P_e - P_1 - P_3)$. Curentul din fiecare ramură provine din 3 termeni proporționali fiecare cu cele 3 puteri de mai sus.

Această soluție conduce în cazurile cele mai dificile la obținerea unei formule de pierderi exactă căci verifică riguros 6 regimuri ale primului palier de putere, plus încă două regimuri ale palierelor diferențiate, adică în total 8 regimuri diferite.

Dacă aceste 8 regimuri încadrează posibilitățile reale de funcționare, ne putem declara mulțumiți.

*

Interesant de observat că extinderea acestui procedeu mai departe, dacă nu s-ar obține încă rezultate, ar conduce în final la determinarea pentru ramurile rebele la un număr de regimuri egal cu numărul coeficienților B, adică la formula propusă recent de autorul coeficienților B [5]. De notat că utilizarea fenomenului fizic, cu stabilirea pierderilor pe ramuri, permite sigur oprirea acestui proces laborios la începutul lui.

Este evident că variațiile dintr-un nod, nu pot influența centrele foarte îndepărtate de acel nod, centre care pe această cale nu sînt considerate ; mersul treptat dozează aproximațiile prin introducerea de centrale noi succesiv în expresiile pe ramuri, pe măsură ce se dovedește necesar.

În tabela ce urmează sînt date rezultate obținute prin procedeele cele mai simple cu *calcul redus* pentru compararea rezultatelor în urma unei singure operații de „dozare" a aproximațiilor. Se observă eficaci-

Tablou reprodus după studiul utilizînd matricea Z (Hockman–Toalston–Herker, referința [2])

Soluții cu calcul, redus pe echivalent REI (DIMO)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Regimul	Putere injectată în nodurile generatoare, MW			Calcul exact $\sum RI^2$, MW	Soluție cu calcul redus $\sum_m \sum_n B_{mn} P_m P_n$ utilizînd matricea $[Z]$	Cu o constantă pe ramură $\sum_m \sum_m B_{mn} P_m P_n$	Idem, cu o corecție pe ramura $1-e$ (2 constante pe această ramură) $\sum_m \sum_n B_{mn} P_n P_n + B_1 P_1 + B_0$	Idem cu o corecție pe 3 ramuri luate împreună. $\sum_m \sum_n B_{mn} P_m P_n + B_0$
	P_1	P_2	P_k					
	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
1 bază	173,6 (173,667)	75,0 (75,17)	100,0 (100,161)	23,7771 —	23,78006	— 23,8129	23,8129	23,8129
2	199,9	50,0	100,0	25,7643	27,7359	25,7216	25,9375	25,7643
3	201,2	75,0	75,0	26,9405	28,7910	26,5127	26,6760	26,8342
4	148,1	100,0	100,0	22,3471	20,5732	21,6780	22,0184	22,3471
5	174,3	100,0	75,0	24,9013	24,7181	24,1662	24,1496	24,6931
6	147,2	75,0	125,0	21,5353	19,9871	21,3880	21,7899	21,5194
7	173,8	50,0	125,0	23,0991	23,4469	23,3905	23,4011	23,0293
8	228,7	50,0	75,0	29,6126	33,6430	28,7004	29,6126	29,5369
9	121,6	100,0	125,0	20,5631	17,2992	19,2756	20,5631	20,5631

Observații: Explicații în anexă. Sistemul analizat este cel din figura 6.

tatea „dozării aproximațiilor" prin introducerea corecțiilor date de regimuri de verificare, dozare care este și ea de tip cu calcul foarte redus.

În anexă sînt date cîteva indicații în legătură cu rezultatele din tablou.

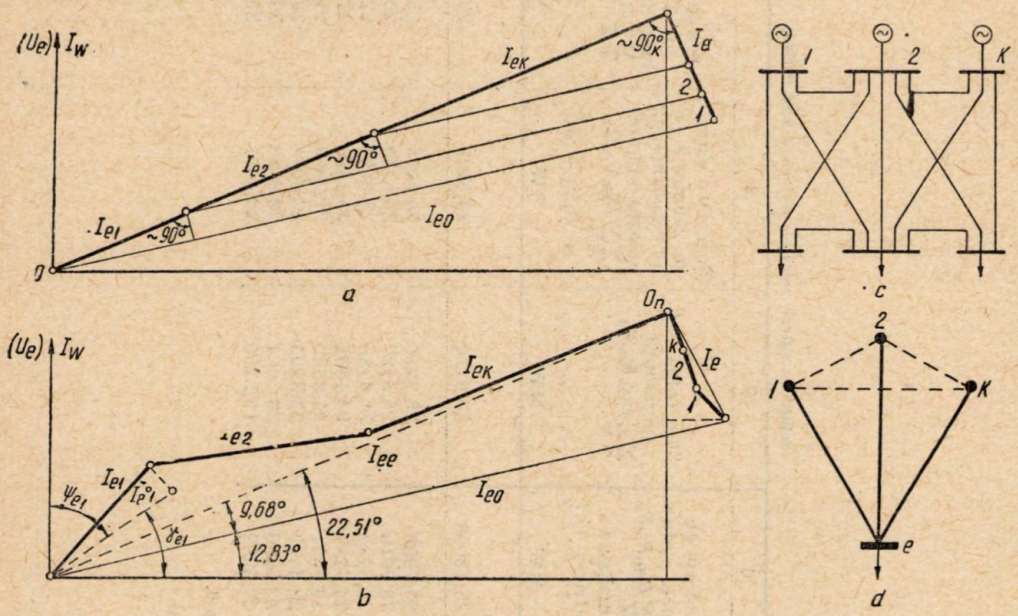


Fig. 6. — *a* — Imaginea nodală a unei scheme REI ideale cu admitanțe omogene, și tensiunile generatoarelor în fază.
b — Imaginea nodală a nodului *e* a schemei *d* — Se văd diferențele față de sistemul ideal în ramurile 1.*e* și 2.*e*.
c — Schema sistemului real ce a fost redus la echivalentul cu sarcină unică din *d*.
d — Echivalentul cu sarcină unică reprezentat ca o schemă REI a nodului central *e*, cu ramuri laterale (punctate).

VI. SOLUȚII PENTRU DETERMINAREA DIRECTĂ A COEFICIENȚILOR DE CREȘTERI RELATIVE ȘI STUDIUL DIRECT AL PIERDERILOR PE ECHIVALENT

Observăm că pe același echivalent se pot determina direct coeficienții de creșteri relative σ, în diverse ipoteze de reglaj al tensiunilor, considerînd schema echivalentului în locul schemei reale. Pierderile totale în acest caz pot fi determinate și din regimuri calculate numai pe echivalent.

VII. CONCLUZII

În cele de mai sus, s-au enumerat cîteva din bogatele posibilități ale echivalentului REI în problemele de pierderi, cu referire specială la stabilirea unei formule cu coeficienți constanți B de tipul formulelor (5) sau (6). Caracterizarea acestor aplicații poate fi enunțată astfel :

— Utilizarea echivalentului REI cu sarcină unică, permite descompunerea sistemului în elemente simple (ramuri), cu structuri ele-

mentare. Schimbarea regimului pe asemenea structuri conduce la un număr minim de variabile care au importanță esențială. Se stabilesc din determinarea pierderilor pe ramuri, componentele formulei de pierderi, din care se obține apoi prin operații simple de adunare formula de pierderi.

— Sînt posibile formule exacte cu calcul relativ redus care să verifice riguros un număr mare de regimuri (8 în soluția (5)).

— Este caracteristic procedeul prin care coeficienții de repartiție ai curenților utilizați generalizat în asemenea probleme (în mod explicit sau nu) sînt găsiți aci direct din examinarea injecției puterilor în echivalent, fără a se trece la ecuațiile explicite ale acestor curenți (ca în soluțiile cu matricea Z). Ramurile echivalentului alcătuiesc localizarea pe model mic și simplu al tuturor fenomenelor, inclusiv considerarea repartiției curenților pentru determinarea formulelor de pierderi, ceea ce permite selecționarea minimului de mărimi ce trebuie considerate în această repartiție.

*

Ca concluzie practică în procedeul „dozării aproximațiilor" recomandat aci pentru aplicare rezultă:

1. Pentru o formulă de pierderi cu calcul redus care să verifice și coeficienții de creșteri relative ale centralelor, se recomandă soluția 4 care conduce la formula:

$$\Pi = \sum\sum B_{mn} P_m P_n + \sum B_m P_n + B_0. \qquad (15)$$

Sînt necesare 3 regimuri cu calculul unui singur echivalent.

2. Dacă condițiile fizice ale sistemului nu permit utilizarea unui singur echivalent REI, se trece mai departe la soluția 5.

Studiul echivalentelor ce rezultă va fi făcut cu toată atenția pentru a reduce la minimum numărul de matrice de gradul 6 (se va cerceta pe ramuri variația pierderilor și se vor reține formulele vechi pentru toate ramurile unde rezultatele sînt suficient de exacte). Comparația pierderilor pe ramuri se poate automatiza și introduce în programele calculatorului numeric.

Se observă că în soluția la care se ajunge se obțin 8 regimuri pe care formula le verifică riguros, oricît de mare ar fi numărul centralelor și oricît de variate ar fi legile de variație a sarcinilor și complicate mijloacele de reglaj.

3. Dacă nici această soluție nu este considerată suficientă, se compară iar pierderile pe ramuri pentru noi regimuri de verificare și se continuă procedeul, introducînd pe ramurile ce dau diferențe noii termeni, corespunzînd unor noi puteri ce au fost neglijate în formula precedentă. În continuare, determinările se fac pe un număr de ramuri din ce în ce mai redus.

Formulele ce se obțin verifică riguros pierderile în absolut toate regimurile utilizate succesiv.

4. Trebuie semnalat ca măsură practică pentru reducerea efectivă a calculului, că operațiile de adunare a termenilor în coeficienți B nu trebuie efectuate decît pentru ultima treaptă de calcul la care s-a rămas.

Pînă acolo, ne vom mulțumi cu determinarea pierderilor (totale și pe ramuri) care comparate dau indicații complete dacă putem opri calculul sau este necesară introducerea în calcul și a noilor regimuri de verificare pentru corijarea coeficienților B obținuți.

*

Prin diferență cu metodele cunoscute caracterele noi rezultă :

— Considerarea în calcul a minimului de elemente variabile necesar în cazul și pentru exactitatea dorită. În metodele curente logica formală impune considerarea tuturor elementelor variabile fără distincție și de multe ori ignorarea legilor fizice.

— Evoluția treptată a calculului orientat de rezultatele pe echivalent, calcul limitat numai la completări ce apar necesar din regimurile ce nu se verifică (ramurile pentru care rezultatele verificării sînt bune ies din calcul).

—Elasticitatea completă în evoluția calculului care poate fi extins pînă la verificarea unui număr oricît de mare de regimuri, cu utilizarea rezultatelor obținute în calculele precedente.

— Obținerea paralelă cu calculul, a unui număr mare de informații suplimentare date de aspectul echivalentelor, a imaginilor și a evoluției lor, ceea ce permite studii de o mare finețe asupra structurii, reglajului [3].

— Laboriozitatea calculului rămîne relativ redusă, prin faptul că numărul termenilor se limitează numai la elementele variabile introduse exclusiv acolo unde intervin real.

ANEXA

Exemplu de calcul — Dozarea aproximațiilor cu utilizarea succesivă a regimurilor de verificare pentru corijarea formulei.

1) *Soluție bazată pe matricea* [Z]

S-a ales exemplul de calcul din literatura tehnică [2] (metoda Hockman — Toalston — Harker) care utilizează o matrice Z, determinată direct pentru un sistem de ecuații cu un singur nod de sarcină.

Matricea [Z] construită de autori este identică cu cea propusă de noi la III; în cazul nostru se obține însă din inversarea matricei [Y] a echivalentului REI cu sarcină unică. Rezultatele calculului cu formula stabilită de autori ca exemplificare sînt trecute în tabela 1 coloana 6, reproduse după [2].

2) *Soluția I. — Structura 1: 1 constantă pe ramură și calcul foarte redus*

În referința [3] am refăcut exemplul cu soluția 1 în care pierderile pe fiecare ramură sînt aproximate cu formula : $P_{ik} = b_{ik} P_i P_k$. Rezultatele sînt date în coloana 7. Pierderile obținute pe ramurile echivalentului din figura 6 *d* au fost :

pe ramura e — 1 18,778889 pe ramura 1 — 2 2,986562

pe ramura $e - 2$ $-0,737909$ pe ramura $1 - K$ $-1,624410$
„ $e - k$ $3,544451$ „ $2 - K$ $-0,865329$

(valorile sînt exprimate în MW).

Coeficienții B ce au rezultat, pentru puteri exprimate în MW (nu în unități relative ca în textul original din [3]) sînt

Coeficienți B soluția I

$$B_{11} = 0,309.834.417.10^{-3} \quad 2\,B_{12} = 0,510.482.667.10^{-3}$$
$$B_{22} = -0,028.127.380.10^{-3} \quad 2\,B_{1K} = 0,317.846.389.10^{-3}$$
$$B_{KK} = 0,101.397.522.10^{-3} \quad 2\,B_{2K} = 0,188.201.256.10^{-3}$$

B_{22} apare negativ din cauza reactanțelor capacitive introduse în schemă pentru reproducerea legii de variație a puterii reactive

$$Qi_{gen} = Q_{fix} + sP$$

Q_{fix} este realizat cu o reactanță

capacitivă aleasă pentru menținerea tensiunilor constante). Ar rezulta că pentru $P_1 = P_3 = 0$, o creștere a lui P_2, conduce la o scădere a pierderilor (curenții scad), ceea ce este posibil numai la variații mici în jurul puterii din regimul de bază rezultat al variației simultane a puterii reactive. Nu pot fi trase concluzii, structura formulei fiind cea mai aproximativă (cu o constantă pe ramuri).

3) *Introducerea unei corecții pe ramura $e - 1$, ramură pentru care se consideră structura 2*

Observăm că regimurile 8 și 9 dau rezultate depărtate cu soluția cea mai simplă — mai observăm :

— Pierderile cele mai mari sînt totalizate în ramura $1 - e$.

— Curenții de scurtcircuit cei mai nealiniați sînt în ramurile $1 - e$ și $2 - e$, ceea ce indică legi de variație mai complexe pentru aceste ramuri (fig. 6 *b*).

Să corijăm numai componența formulei de pierderi dată de ramura $e - 1$, utilizînd structura 2, cu două constante pe ramură. Utilizăm chiar regimul 8 și 9, și determinăm constantele din formula (11), utilizînd și regimul de bază. În ipoteza că în restul ramurilor pierderile în regimurile 8 și 9 sînt cele date de formula veche, rezultă pierderile din ramura $1 - e$:

— regimul 8 de verificare $p_{ie} = 25,974.975$,
— regimul 9 de verificare $p_{ie} = 14,345.873$,
— regimul 1 bază $p_{ie} = 18,778889$.

Se determină coeficienții din formula (11) din cele 3 ecuații ce rezultă și apoi pierderile totale și în restul regimurilor. Rezultatele sînt trecute în coloana 8. Noii coeficienți B sînt

$$B_{11} = 0,425.946.439.10^{-3} \quad 2\,B_{1k} = 0,008.011.972.10^{-3}$$
$$B_{22} = -0,028.127.380.10^{-3} \quad 2\,B_{2k} = 0,188.201.256.10^{-3}$$
$$B_{KK} = 0,101.397.522.10^{-3} \quad B_1 = -0,040.627.319$$
$$2B_{12} = 0,200.648.250.10^{-3} \quad B_0 = 12,987.872.600$$

4) *Introducerea unei corecții globale pe 3 ramuri $1 - e$, $2 - e$ și $1 - 2$ (vezi figura 5)*

Considerînd faptul că B_{22} a rezultat negativ din prima soluție, precum și imaginea nodului central (fig. 6 *b*), care indică și pentru ramura $2 - e$ legi de variație mai complexe, o altă soluție de corecție ar fi fost să considerăm ramurile $1 - e$, $2 - e$ și $1 - 2$ împreună. Încercăm structura 3 cu o formulă — pe cele 3 ramuri de tipul formulei (13) însă cu $B'_{ie-i} = B_{ie-k} = C'_{ie-ki} = 0$, deoarece dorim să ne menținem la o formulă de tipul 6 (fără termeni

cu puteri simple). Observăm că ne sînt necesare 4 regimuri de verificare (determinarea include şi cazul mai general în care ar fi variat şi rezistenţele acestor ramuri pe echivalent ; vezi în text structura 3).

Să presupunem că am fi dispus de regimul de verificare 9, 4 şi 2 în care au variat puterile în 1 şi 2.

Pe restul ramurilor pierderile sînt calculate cu soluţia 1. Se deduc pierderile pe cele 3 ramuri luate împreună :

Regimul 2 de verificare $p_{1e}+p_{2e}+p_{12} = 23{,}508.525,$
„ 4 de „ $= 19{,}051.183,$
„ 9 de „ $= 16{,}152.877,$
„ 1 de bază $= 21{,}027.532.$

Din cele 4 valori de mai sus deducem constantele $A'_{ie} - 1$, $A'_{ie} - 2$, C'_{ie} şi D'_{ie} ale formulei (13). Obţinem pierderile totale în cele 9 regimuri trecute în coloana 9, şi noua serie de coeficienţi B

Coeficienţii B pentru formulă cu corecţie globală pe ramurile $1-e$, $2-e$, $1-2$

$B_{11} = 0{,}346.869.754.10^{-3}$ $\quad 2\,B_{1k} = 0{,}008.011.972.10^{-3}$
$B_{22} = 0{,}137.836.501.10^{-3}$ $\quad 2\,B_{2k} = 0{,}216.328.626.10^{-3}$
$B_{kk} = 0{,}101.397.522.10^{-3}$ $\quad B_0 = 7{,}721.881.200.$
$2\,B_{12} = 0{,}158.192.518.10^{-3}$

5. *Verificarea formulei pentru un alt palier de putere (P_e schimbat) şi corijarea ei utilizînd regimul de verificare*

Să considerăm regimul 10, cu puteri totale cu 10% mai mici ca cel din regimul 1 :

$$P_1 = 156{,}240, \quad P_2 = 67{,}5, \quad P_k = 90.$$

Pierderile totale pentru regimul 10, calculate exact pe schema reală în o anumită ipoteză de reglaj al tensiunilor sînt : 20,350.150.

Aceleaşi pierderi calculate cu formula stabilită la punctul 4 mai sus sînt 20,733.818.

Corecţia se va face conform celor arătate la soluţia 4 în text, cu formulele (14) şi (15).

Deoarece formula de pierderi stabilită, conţine un termen constant (B_0) dar nu conţine coeficienţi B_n ce înmulţesc puteri simple, rezultă necesară determinarea unei singure constante de corecţie : c_2 din formula (15).

Diferenţa de pierderi $\Delta\Pi$, conform formulei (15) între formulă şi regimul real este egală cu :

$$B_0\, c_2\, (P_e \text{ nou} - P_e \text{ vechi}) = \Delta\Pi$$

de unde cu

$$P_e \text{ nou} = 313{,}74 \text{ se deduce } c_2 = -\,0{,}001409.$$

Noua formulă de pierderi în care apar acum şi termenii B, din explicitarea lui P_e nou, verifică riguros şi acest ultim regim păstrînd intacte rezultatele din coloana 9.

Coeficienţii B corijaţi şi completaţi sînt :

$B_{11} = 0{,}346.869.754.10^{-3}$ $\quad 2\,B_{1k} = 0{,}008.011.972.10^{-3}$
$B_{22} = 0{,}137.836.501.10^{-3}$ $\quad 2\,B_{2k} = 0{,}216.328.636.10^{-3}$
$B_{kk} = 0{,}101.397.522.10^{-3}$ $\quad B_1 = B_2 = B_3 = 0{,}010.880.131$
$2\,B_{12} = 0{,}158.192.518.10^{-3}$ $\quad B_0 = 3{,}924.737.377$

Calculele acestui exemplu au fost executate de inginerii Ungureanu B. și Iancovici Persida (I.S.P.E.) cu mașinile CIFA 103—4.

Observație importantă

În acest exemplu s-au ales formule cu structurile cele mai simple. S-a pornit de la o formulă cu o constantă pe ramuri.

În text s-a recomandat pornirea calculului cu structura, cu 3 constante pe ramură, care dă o exactitate mult mai mare, cu un volum de calcul încă redus. Cu această structură sînt multe șanse ca cel puțin pe ramurile laterale să ne mulțumim cu prima serie de formule, chiar în cazul cînd echivalentul rezultat din primul regim nu mai e aplicabil în alte regimuri (sarcini neconforme, reglaje etc.). Ramurile radiale în caz de corecție, pot fi grupate ca în acest exemplu (vezi și fig. 5), micșorînd astfel numărul ecuațiilor.

LOSSES IN ELECTRICAL NETWORKS : SOLUTION OF THE PROBLEM BY MEANS OF THE "REI" EQUIVALENT OF THE "NODAL ANALYSIS" AND THE DIGITAL COMPUTER

ABSTRACT

After a description of the manner in which the "REI" equivalent of the single "sole load system" is obtained, the author shows the new way by which this equivalent leads to the study of the losses problem, as well as to the establishment of various formulae. Generally, the new elements are :

1. The basic state equivalent.

2. Whenever the state is changed, simple variation laws of the local ramification losses are to be determined.

3. According to the established laws and to the value of the basic state losses, various loss formulae shall be deduced.

4. The loss formulae thus deduced shall be verified for new states, by direct loss computation with the help of $\sum RT^2$. If the results of these verifications prove to be unsatisfactory, the deduced formula shall be made up with new terms deduced from each branch. In this way, the amended formula shall verify all the old states, as well as the new one. An accuracy dosing of the formula is thus reached, which shall always verify all the "verification" states.

5. Therefore, this method makes also use of the verification states for the amendment of the deduced formula, thus allowing the obtain simple though accurate formulae about the real states of the respective network, with a minimum of computation.

6. It is to be remarked that, from a mathematical standpoint, the method makes use, in loss formulae, of equations of type $I = \mathrm{Y}\,E$ instead of the usual ones of type $E = Z\,I$.

7. The arguments go on with the "equivalent" of the system and with the standard nodal images.

BIBLIOGRAFIE

1. P. DIMO, *Conceptele şi procedeele „analizei nodale" asociată calculatoarelor numerice.* St. cerc. de energ., **XIII**, *3*, seria A (1963).
2. HOCHMANN, TOALSTON, HARKER, *Loss formula determination by a new method.* Power Apparatus and Systems, February, 1961.
3. P. DIMO, *Formula pierderilor şi optimizarea schemelor şi regimurilor pe un drum nou. Aplicarea „Analizei nodale".* Energetică, **10**, *6* (1962).
4. LEON KIRCHMAYER, *Economic operation of Power Systems.* G. Willey, London, 1958.
5. E. GEORGE, *A new method of making transmission loss formulas directly from digital power flow studies.* Power Apparatus and Systems, February, 1960.
6. C. GUTU, *O generalizare a formulei pierderilor din reţeaua electrică în funcţie de sarcinile centralelor.* St. cerc. energ., **XII**, *3* (1962).

EFECTELE DE MARGINE ȘI DE PROXIMITATE ÎN BARELE CU SECȚIUNEA DREPTUNGHIULARĂ, LA REFULARE NETĂ A CURENTULUI ELECTRIC

DE

Acad. REMUS RĂDULEȚ și CONSTANTIN MOCANU

538.542 : 621.315.513

1. *Reducerea problemelor de efect pelicular net la probleme exterioare.* In regim cvasistaționar, intensitățile $\bar{E}$ și $\bar{H}$ ale cîmpurilor electric și magnetic, respectiv densitatea $\bar{J}$ a curentului electric de conducție, satisfac în mediile omogene și isotrope, de permeabilitate μ și conductivitate σ, o aceeași ecuație cu derivate parțiale

$$\Delta\bar{G} - \varkappa\mu\sigma \frac{\partial\bar{G}}{\partial t} = 0, \tag{1}$$

unde $\bar{G}$ reprezintă pe $\bar{E}$, pe $\bar{H}$ sau pe $\bar{J}$, iar $\varkappa$ reprezintă coeficientul de raționalizare, egal cu 1 în sistemele de unități de măsură raționalizate și egal cu 4π în cele neraționalizate. Cu $\sigma = 0$, ecuația (1) este valabilă și în exteriorul conductorului, însă numai pentru $\bar{E}$ și $\bar{H}$

$$\Delta\bar{G} = 0. \tag{1a}$$

Dacă se integrează ecuația (1) pentru cazul unui conductor care are o suprafață plană, ocupă jumătate din spațiu, restul fiind izolant, și se găsește în prezența unui cîmp magnetic de excitație omogen, alternativ, de pulsație ω și tangent la suprafața lui, se deduce că puterea activă care

se transformă în conductor în căldură este absorbită cu următoarea densitate superficială S prin aria suprafeței A [1]:

$$S = \frac{\rho}{\varkappa^2}\sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}} \cdot H_e^2, \tag{2}$$

unde H_e este valoarea efectivă a intensității cîmpului magnetic la suprafața conductorului, iar ρ rezistivitatea. Se mai demonstrează că, în cazul refulării nete a curentului electric, densitatea de arie a puterii reactive absorbite de conductor prin suprafața sa are tot expresia (2) și că în exteriorul conductorului intensitatea $\overline{H}$ a cîmpului magnetic este tangentă la suprafața lui, indiferent dacă acest cîmp este produs numai de curentul electric de aducție care trece prin conductor, sau dacă este produs atît din exteriorul conductorului, cît și de curenții electrici induși de acesta în conductor. Expresia (2) reduce problema calculului puterii active absorbite de un conductor care prezintă în toate direcțiile refulare netă a curentului, la determinarea intensității $\overline{H}$ a cîmpului magnetic în exteriorul conductorului, unde $\sigma = 0$ și deci aceasta satisface ecuația

$$\Delta\overline{H} = 0, \tag{3}$$

care rezultă din (1a) și anume cu condițiile la limită ca $\overline{H}$ să fie pretutindeni tangent la suprafața conductorului. Aceasta este însă pentru fiecare componentă a intensității cîmpului o problemă de teoria potențialului, exterioară conductorului, atît în cazul curentului de aducție, cînd $\overline{H}$ este nul la infinit, cît și în cazul curenților turbionari induși din exterior, cînd $\overline{H}$ poate să nu fie nul la infinit.

2. *Efectul omogen de proximitate în barele cu două plane de simetrie perpendiculare.* Efectul de proximitate consistă în influențarea repartiției curentului de conducție dintr-un conductor de către cîmpul magnetic suplimentar produs de curentul dintr-un conductor situat în apropierea lui și care ar induce singur în primul conductor curenți avînd în acesta direcția medie a curentului de aducție.

Dacă $\overline{H}_a$ este intensitatea efectivă a cîmpului magnetic perpendicular pe axa unui conductor drept, pe care l-ar determina numai curentul de aducție din conductor, și $\overline{H}_n$ este intensitatea efectivă a cîmpului perpendicular pe axa conductorului, pe care l-ar determina în același loc numai curenții din conductorul sau conductoarele care dau efectul de proximitate, în ipoteza că aceste două intensități sînt sinfazice, intensitatea efectivă $\overline{H}$ a cîmpului magnetic rezultant este

$$\overline{H} = \overline{H}_a + \overline{H}_n,$$

cum rezultă din ecuația liniară (1), iar puterea activă absorbită de conductorul în care există și efect de proximitate are conform cu (2) expresia

$$P = \frac{\rho}{\varkappa^2}\sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}} \int_{S_l} (\overline{H}_a^2 + \overline{H}_n^2 + 2\overline{H}_a\,\overline{H}_n)\,\mathrm{d}A, \tag{2a}$$

unde S este suprafața laterală a conductorului.

Pentru conductoare străine care se găsesc, faţă de conductorul în care determină efectul de proximitate, la distanţe destul de mari în raport cu dimensiunile liniare ale acestuia, însă şi în anumite cazuri mai generale, — cîmpul magnetic efectiv exterior $\overline{H}_{ext}$, stabilit de acestea în conductorul influenţat, poate fi aproximat printr-un cîmp efectiv omogen $\overline{H}_0$, cu linii de cîmp drepte, egal de exemplu cu media vectorială, ponderată cu elementele de arie, ale intensităţilor cîmpului magnetic efectiv exterior străin $\overline{H}_{ns}$, pe suprafaţa laterală S_l, de arie A_l, a conductorului influenţat

$$\overline{H}_0 = \frac{1}{A_l} \int_{S_l} \overline{H}_{ns} \, \mathrm{d}A. \tag{3a}$$

Se obţine astfel pentru puterea activă absorbită de conductorul care prezintă acest efect „omogen" de proximitate următoarea aproximaţie, în care $\overline{H}_p$ corespunde inducerii acestui conductor de către cîmpul magnetic exterior omogen $\overline{H}_0$

$$P = \frac{\rho}{\varkappa^2} \sqrt{\frac{\varkappa \mu \omega \sigma}{2}} \int_{S_l} (\overline{H}_a^2 + \overline{H}_p^2 + 2\overline{H}_a \overline{H}_p) \, \mathrm{d}A. \tag{2b}$$

În cazul unei bare drepte care prezintă două plane de simetrie perpendiculare unul pe altul, din cauze de simetrie, intensităţile (efective sau instantanee) $\overline{H}_{a1}$ şi $\overline{H}_{a2}$ ale cîmpului magnetic determinat de curentul de aducţie în două puncte P_1 şi P_2 din planul unei secţiuni şi care sînt simetrice în raport cu punctul de intersecţie al secţiunii cu planele de simetrie sînt egale şi de sensuri contrare : $\overline{H}_{a1} = -\overline{H}_{a2}$ (fig. 1*a*), iar intensităţile efective (sau şi instantanee) $\overline{H}_{p1}$ şi $\overline{H}_{p2}$ pe care le are în aceleaşi două puncte intensitatea cîmpului determinat de prezenţa barei în cîmpul magnetic exterior omogen $\overline{H}_0$ sînt egale $\overline{H}_{p1} = \overline{H}_{p2}$ (fig. 1*b*). Dacă se împarte deci integrala din expresia (2b) în suma a două integrale, extinse pe două jumătăţi S_1 şi S_2 ale suprafeţei laterale a barei, care se obţin secţionînd-o cu un plan care trece prin axa de intersecţie a planelor ei de simetrie, se obţine deci următoarea expresie a integralei din formula (2b)

$$\int_{S_l} (\overline{H}_a^2 + \overline{H}_p^2 + 2\overline{H}_a \overline{H}_p) \, \mathrm{d}A = \int_{S_1} (\overline{H}_{a1}^2 + \overline{H}_{p1}^2 + 2\overline{H}_{a1} \overline{H}_{p1}) \, \mathrm{d}A_1 +$$

$$+ \int_{S_2} (\overline{H}_{a1}^2 + \overline{H}_{p1}^2 - 2\overline{H}_{a1} \overline{H}_{p1}) \, \mathrm{d}A_2 = 2 \int_{S_1} (\overline{H}_{a1}^2 + \overline{H}_{p1}^2) \, \mathrm{d}A_1 = \int_{S_l} (\overline{H}_a^2 + \overline{H}_p^2) \, \mathrm{d}A$$

şi deci expresia (2b) devine

$$P = \frac{\rho}{\varkappa^2} \sqrt{\frac{\varkappa \mu \omega \sigma}{2}} \left[\int_{S_l} \overline{H}_a^2 \, \mathrm{d}A + \int_{S_l} \overline{H}_p^2 \, \mathrm{d}A \right]. \tag{2c}$$

Fiindcă ecuaţia (1), respectiv (3), este liniară, intensitatea $\overline{H}_p$ a cîmpului magnetic determinat de un cîmp magnetic exterior şi omogen

$\overline{H}_0$, înclinat față de cele două plane de simetrie ale unei bare, este egală în fiecare punct cu suma intensităților $\overline{H}'_p$ și $\overline{H}''_p$, pe care le determină în fiecare punct două cîmpuri magnetice exterioare și omogene $\overline{H}'_0$ și $\overline{H}''_0$,

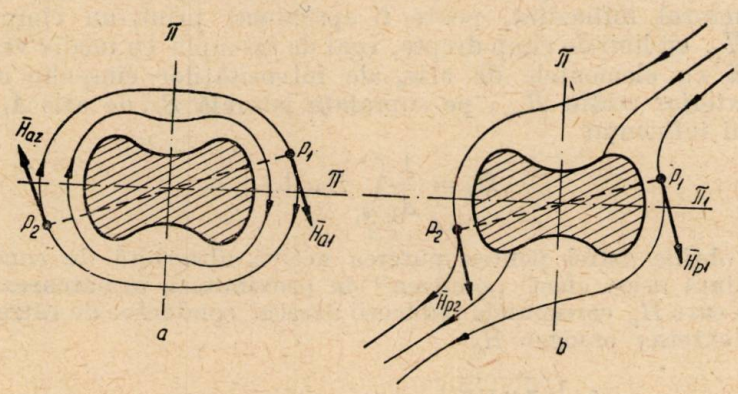


Fig. 1. — Cîmpurile magnetice din jurul unei bare cu două axe de simetrie perpendiculare, determinate la refulare netă de curentul alternativ care parcurge bara (fig. 1 *a*), respectiv de prezența unui cîmp magnetic exterior omogen, alternativ (fig. 1 *b*).

egale cu componentele vectoriale ale intensității $\overline{H}_0$ după cele două plane de simetrie 1 și 2

$$\overline{H}_p = \overline{H}'_p + \overline{H}''_p.$$

Ultima integrală din croșeta din formula (2c) se poate pune sub forma următoare :

$$\int_{S_l} \overline{H}_p^2 \, dA = \int_{S_l} (\overline{H}_p'^2 + \overline{H}''^2_p + 2\overline{H}'_p \overline{H}''^2_p) \, dA.$$

Integrala care urmează este însă nulă

$$\int_{S_l} \overline{H}'_p \overline{H}''_p \, dA = 0.$$

În adevăr, dacă într-un punct P_1 (fig. 2*a*, 2*b*) din cadranul 1 al planelor de simetrie Π_1 și Π_2, cu versorii $\bar{i}$ și $\bar{j}$ în planul secțiunilor drepte ale barei, intensitățile cîmpurilor $\overline{H}'_p$ și $\overline{H}''_p$ sînt $(\bar{i}\, H'_i + \bar{j}\, H'_j)$ și $(\bar{i}\, H''_j + \bar{j}\, H''_i)$, ele sînt în simetricul P_2 al lui P_1, din cadranul 2, $(\bar{i}\, H'_i - \bar{j}\, H'_j)$ și $(-\bar{i}\, H''_i + \bar{j}\, H''_j)$, în simetricul P_4 al lui P_1, din cadranul 4, $(+\bar{i}\, H'_i - \bar{j}\, H'_j)$ și $(-\bar{i}\, H''_i + \bar{j}\, H''_j)$, iar în simetricul lui P_1, din cadranul 3, $(\bar{i}\, H'_i + \bar{j}\, H'_j)$ și $(\bar{i}\, H''_i + \bar{j}\, H''_j)$. Descompunînd deci ultima integrală într-o sumă de patru integrale, referitoare la cele patru părți din suprafața

laterală a barei, determinate de cele două plane de simetrie, se obține

$$\int_{S_l} \overline{H}'_p \overline{H}''_p \, dA = \int_{S_1} (\bar{i} H'_i + \bar{j} H'_j)(i H''_i + j H''_j) \, dA +$$

$$+ \int_{S_2} (\bar{i} H'_i - \bar{j} H'_j)(\bar{j} H''_j - \bar{i} H''_i) \, dA + \int_{S_3} (\bar{i} H'_i + \bar{j} H'_j)(i H''_i + j H''_j) \, dA +$$

$$+ \int_{S_4} (\bar{i} H'_i - \bar{j} H'_j)(\bar{j} H''_j - i H''_i) \, dA = 0,$$

fiindcă suma primelor două integrale este nulă, ca și suma ultimelor două. Rezultă că formula (2c) se poate pune și sub forma

$$P = \frac{\rho}{\varkappa^2} \sqrt{\frac{\varkappa \mu \omega \sigma}{2}} \left[\int_{S_l} \overline{H}^2 \, dA + \int_{S_l} \overline{H}'^2_p \, dA + \int_{S_l} \overline{H}''^2_p \, dA \right]. \qquad (2\,d)$$

Formula (2d) arată că puterea activă absorbită de o bară conductoare dreaptă și având două plane longitudinale de simetrie, parcursă de curent alternativ armonic și prezentînd efect „omogen" de proximitate, este egală cu suma celor trei puteri active pe care bara le-ar absorbi dacă numai ea ar fi parcursă de curentul de aducție, respectiv dacă bara nu ar fi parcursă de curent de aducție și s-ar găsi o dată în componenta $\overline{H}'_0$ după unul din planele de simetrie al intensității cîmpului magnetic exterior, omogen și armonic al conductoarelor care determină efectul de proximitate, iar o dată în componenta ei $\overline{H}''_0$, după celălalt plan de simetrie. Ea poate fi utilizată în special cînd nu se poate rezolva cu mijloace simple problema de curenți turbionari în cîmpul magnetic exterior

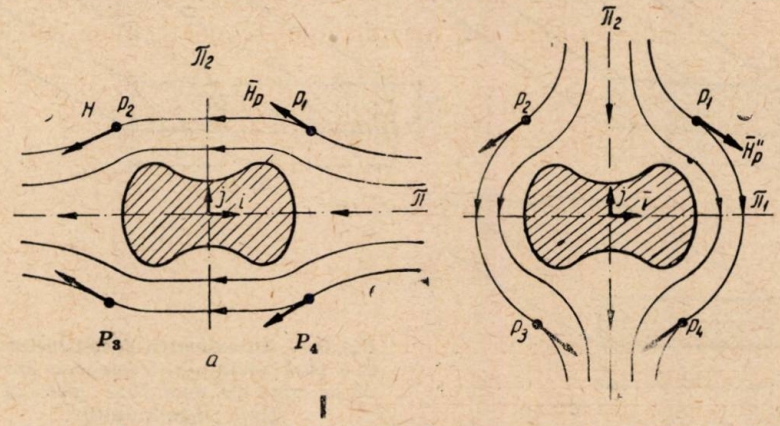


Fig. 2. — Descompunerea intensității cîmpului magnetic din fig. 1 *b* în suma a cîte două intensități de cîmp (fig. 2 *a* și 2 *b*).

omogen și înclinat față de planele de simetrie ale barei, însă se pot rezolva cu mijloace mai simple cele două probleme respective, în cîmpurile magnetice exterioare omogene și paralele cu planele de simetrie ale barei.

Cum $H_0' = H_0 \cos\alpha$ și $H_0'' = H_0 \sin\alpha$, unde α, este unghiul format de $\overline{H}_0$ cu planul de simetrie Π_1, și cum ecuația (1) este liniară, dacă $\overline{h}_p'$ și $\overline{h}_p''$ sînt intensitățile cîmpului magnetic determinate de valori absolute echiunitare ale mărimilor $\overline{H}_0'$ și $\overline{H}_0''$, rezultă că mărimile $\overline{H}_p'$ și $\overline{H}_p''$, care corespund mărimilor $\overline{H}_0'$ și $\overline{H}_0''$, au expresiile

$$\overline{H}_p' = H_0 \cos\alpha\, \overline{h}_p' : \overline{H}_p'' = H_0 \sin\alpha\, \overline{h}_p'',$$

și deci formula (2d) devine

$$P = \frac{\rho}{\varkappa^2} \sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}} \left[\int_{S_l} \overline{H}_a^2 \, dA + H_0^2 (\cos^2\alpha \int_{S_l} \overline{h}_p'^2 dA + \sin^2\alpha \int_{S_l} \overline{h}_p''^2 dA) \right] \cdot \quad (4)$$

3. *Efectul de margine în bara conductoare plată de secțiune dreptunghiulară, la refulare netă a curentului de aducție.* Determinarea densității curentului alternativ care trece printr-o bară plată și a rezistenței corespunzătoare pe baza asimilării acesteia cu o fîșie de lățimea ei și făcînd parte dintr-o placă plană infinită care are grosimea barei conduce la rezultate care diferă sensibil de datele experimentale. Cercetările experimentale efectuate de H. Schwenkhagen [2] și de S. Kohri [3], au pus în evidență un *efect de margine* în direcția lățimii barelor. De aceea este nevoie să se țină direct seamă de lățimea finită a barelor, ceea ce dă și o refulare a curentului spre fețele-muchii ale lor (efectul de margine). J. D. Cockroft [8] a realizat aceasta abordînd direct problema barei de secțiune dreptunghiulară cu efect pelicular net, cu ajutorul

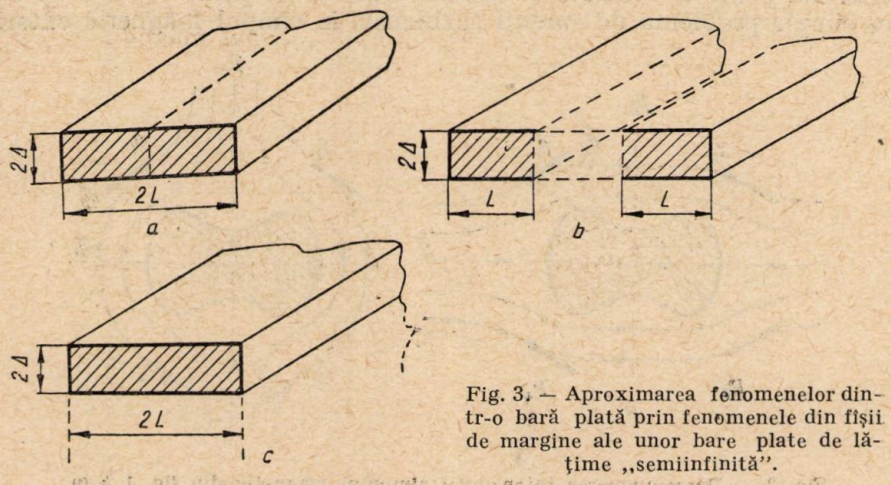


Fig. 3. — Aproximarea fenomenelor dintr-o bară plată prin fenomenele din fîșii de margine ale unor bare plate de lățime „semiinfinită".

transformării Schwarz-Christoffel, obținînd o soluție în care intervin integrale eliptice. În lucrarea de față se abordează această problemă cu ajutorul unor mijloace matematice mai puțin complicate, la refulare netă a curentului, asimilînd fenomenele din fiecare din cele două jumă-

tăți de bară (fig. 3*a*), considerate după lățimea ei, cu fenomenele care se produc într-o bară de lățime semiinfinită și de grosimea barei reale, într-o fișie de margine având lățimea egală cu jumătate din lățimea barei reale (fig. 3*b*). Această asimilare conduce la calcule mai simple, iar compararea rezultatelor cu datele experimentale arată că aproximația conduce la valori calculate care reproduc aceste rezultate cu destulă precizie.

Abordăm deci cu ajutorul aceleiași asimilări problema efectului „omogen" de proximitate în bara plată.

Dacă placa conductoare plată, de secțiune dreptunghiulară și de lățime $2L$, mai mare decît grosimea ei $2\,\Delta$, cu conductivitatea σ și permeabilitatea magnetică μ, este parcursă de curentul electric sinusoidal

$$i = \sqrt{2}I \sin \omega t$$

și prezintă refulare netă a acestuia, curentul electric se repartizează cu densitate practic liniară J_l la suprafața plăcii, iar intensitatea $\overline{H}$ a cîmpului magnetic la suprafață are în exterior numai componentă tangențială $\overline{H}_e = \overline{H}_t$, și în interior este nulă $\overline{H}_i = 0$. Forma locală a legii circuitului magnetic are deci în regim cvasistaționar, la suprafața plăcii, forma următoare, în care intervine rotorul de suprafață al intensității cîmpului magnetic :

$$\mathrm{rot}_s \overline{H} = \overline{e}_{ie} \times (\overline{H}_e - \overline{H}_i) = \overline{e}_{ie} \times \overline{H}_t = \varkappa \overline{J}_l, \tag{5}$$

unde $\overline{e}_{ie}$ este versorul normal pe suprafața plăcii, dirijat după normala ei exterioară, iar $\varkappa$ este coeficientul de raționalizare a ecuațiilor cîmpului electromagnetic (egal cu unitatea pentru forma lor rațională și egal cu 4π pentru forma lor clasică, nerațională).

Cîmpul magnetic potențial din exteriorul plăcii poate fi determinat prin reprezentarea conformă pe semiplanul superior, a domeniului determinat de acest exterior în planul unei secțiuni drepte prin bară, cu ajutorul teoremei lui Schwartz și Christoffel — și anume, de exteriorul plăcii de lățime semiinfinită, în aproximația considerată.

Dacă $z = x + jy$ este planul complex al plăcii și $w = u + jv$ este planul în care se trece prin reprezentare conformă, astfel încît conturul Γ_z al plăcii de lățime semiinfinită să se transforme în axa reală Γ_w din planul w, iar tensiunile magnetomotoare ale intensităților cîmpului magnetic H_z și H_w din cele două plane să fie egale (fig. 4)

$$\oint_{\Gamma_z} H_z \,\mathrm{d}z = \oint_{\Gamma_w} H_w \,\mathrm{d}w, \tag{6}$$

atunci,

$$H_z = H_w \frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}z}. \tag{6a}$$

Intensitatea H_w a cîmpului magnetic în planul w este constantă, iar din legea circuitului magnetic, aplicată conturelor Γ_w și Γ_z, rezultă

$$\oint_{\Gamma_w} H_w \,\mathrm{d}w = H_w \oint_{\Gamma_w} \mathrm{d}w = 2 H_w u_0 = \varkappa I, \tag{6b}$$

dacă I este curentul din placă, iar u_0 este lungimea măsurată de-a lungul axei reale din planul complex w, corespunzînd lățimii L a unei fîșii de margine din placa de lățime semiinfinită, de unde rezultă

$$H_w = \frac{\varkappa I}{2U_0}.$$

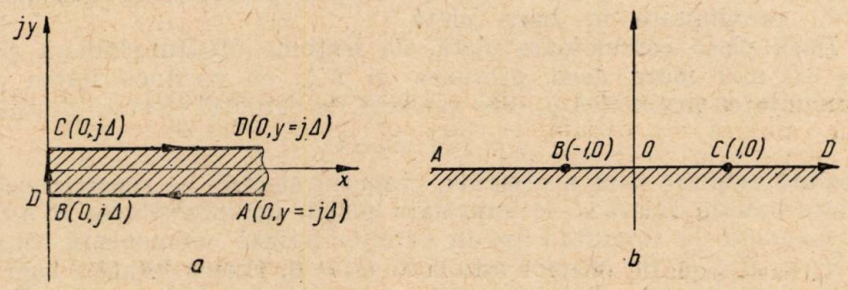


Fig. 4. — Reprezentarea conformă folosită pentru rezolvarea problemei exterioare corespunzătoare efectului pelicular net.

Intensitatea H_z a cîmpului magnetic (6a) din planul z are deci expresia,

$$H_z = \frac{u\ I}{2\ u_0}\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}z}, \tag{7}$$

în care derivata $\mathrm{d}w/\mathrm{d}z$ este dată de transformarea lui Schwarz — Christoffel a conturului Γ_z în conturul Γ_w și are forma

$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}w} = M(w-a_1)^{\alpha_1/\pi}(w-a_2)^{\alpha_2/\pi}\ldots(w-a_n)^{\alpha_n/\pi}. \tag{10}$$

unde

$$-\infty < a_1 < a_2 \ldots < a_n$$

$$-\pi \leqslant \alpha j \leqslant 3\pi\,(j=1,2,\ldots,n)\,;\ -\pi \leqslant \sum_{j=1}^{n}\alpha_j \leqslant 3\pi\,;\alpha_j \neq 0$$

$$\alpha_{n+1} = 2\pi - \sum_{1}^{n}\alpha_j.$$

În cazul plăcii de lățime semiinfinită, cu $\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\pi}{2}$ (fig. 4), formula (10) ia forma

$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}w} = M(w+1)^{\frac{1}{2}}(w-1)^{\frac{1}{2}} = M\sqrt{w^2-1}, \tag{11}$$

care, integrată, dă

$$z = M\tfrac{1}{2}\left[w\sqrt{w^2-1} - \ln\left(w+\sqrt{w^2-1}\right)\right] + N. \tag{11 a}$$

Constantele M şi N rezultă din corespondenţa în planele z şi w a punctelor D şi C prin transformarea (11 a) şi au valorile

$$M = \frac{4\Delta}{\pi} \text{ şi } N = j\Delta,$$

adică

$$z = \frac{2\Delta}{\pi}\left[w\sqrt{w^2-1} - \ln\left(w+\sqrt{w^2-1}\right)+j\,\frac{\pi}{2}\right]. \tag{12}$$

Pentru $w = u$ şi $z = L$ rezultă de aici următoarea ecuaţie, din care se obţine valoarea u_0 a variabilei u, care corespunde unei valori date a raportului L/Δ:

$$u_0\sqrt{u_0^2-1} - \ln\left(u_0+\sqrt{u_0^2-1}\right) - \frac{\pi}{2}\,\frac{L}{\Delta} = 0. \tag{12 a}$$

Această ecuaţie poate fi rezolvată prin încercări sau grafic, cu notaţiile

$$y_1 = u_0\sqrt{u_0^2-1}\,;\; y_2 = \ln\left(u_0+\sqrt{u_0^2-1}\right);\; y_3 = \frac{\pi}{2}\,\frac{L}{\Delta}.$$

Funcţiunile y_1 şi y_2 nu depind de parametrul $\frac{L}{\Delta}$, aşa încît grafic, stabilind o relaţie de scară pentru axa absciselor în funcţie de L/Δ, se poate citi direct soluţia, construind dreapta $y = L\,\frac{\pi}{2\Delta}$ pentru diferite valori ale lui $\frac{L}{\Delta}$.

În figura 5, s-a reprezentat funcţia $y = y_1 - y_2$, a cărei intersecţie cu axa u_0 ne dă rădăcina u_0 a ecuaţiei (12 a).

Mărimea u_0 fiind transformata lui L, ecuaţia (12 a) are o singură rădăcină.

Din (7) şi (11) rezultă expresia intensităţii H_z a cîmpului magnetic, în planul unei secţiuni drepte prin placă

$$H_z = \frac{\varkappa}{4}\cdot\frac{I}{u_0}\cdot\frac{\pi}{\Delta}\cdot\frac{1}{\sqrt{w^2-1}}. \tag{13}$$

Cîmpul magnetic H — şi deci şi densitatea liniară de curent J_l — sînt infinite la colţurile plăcii şi tind asimptotic spre valori limită cînd x tinde (în planul z) către infinit.

Cum, la refulare netă a curentului, partea reală a vectorului lui Poynting are la suprafaţa plăcii expresia (2) cu $H_e = H_l$, unde H_l derivă din H_z dat de (7) rezultă

$$S = \frac{\rho}{x^2}\sqrt{\frac{\varkappa\,\mu\,\omega\,\sigma}{2}}\,\frac{\varkappa^2 I^2}{4u_0^2}\left(\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}z}\right)_{v=0}\cdot\left(\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}z}\right)^*_{v=0}.$$

Dacă se folosește asimilarea fenomenelor din fiecare din cele două jumătăți ale barei reale cu fenomenele care se produc în bara de lățime semiinfinită și de grosimea ei, într-o fișie de margine avînd lățimea egală cu jumătate din lățimea barei reale, se obține puterea activă P pe uni-

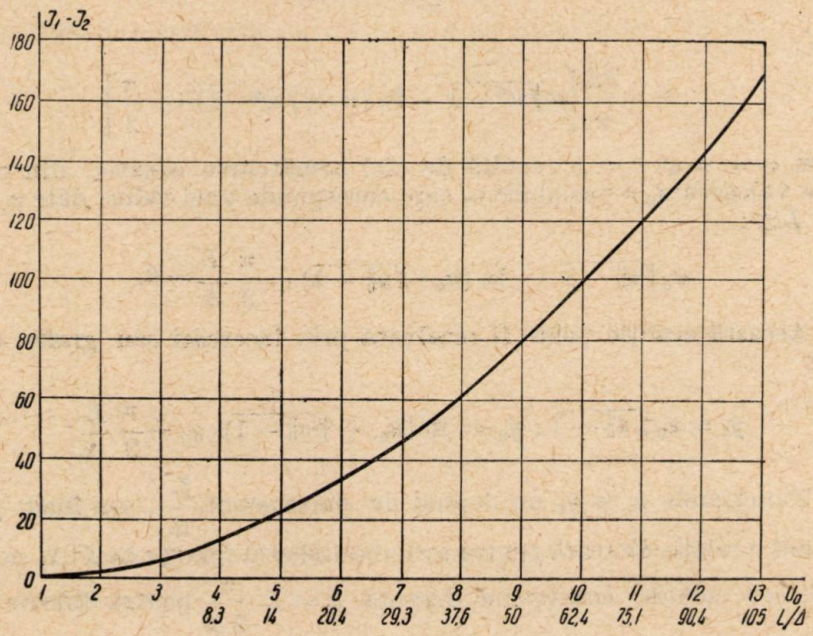


Fig. 5. — Reprezentarea grafică a funcției $y_1 - y_1 = u_0\sqrt{u_0^2 - 1} - \ln(u_0 + \sqrt{u_0^2-1})$.

tatea de lungime de placă, integrînd asupra mărimii S pînă la lățimea L, căreia îi corespunde în planul w abscisa u_0

$$P = \rho\sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}}\cdot\frac{I^2}{4u_0^2}\int_{-u_0}^{+u_0}\left|\frac{dw}{dz}\right|\cdot|dw| = \rho\sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}}\,\frac{\pi I^2}{16u_0^2\Delta}\times\left[\int_{-u_0}^{-1}\frac{du}{\sqrt{u^2-1}} + \right.$$

$$\left. + \int_{-1}^{+1}\frac{du}{\sqrt{1-u^2}} + \int_{+1}^{+u_0}\frac{du}{\sqrt{u^2-1}}\right] = \rho\sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}}\,\frac{\pi I^2}{16u_0^2\Delta}\left[\ln\frac{u_0^2+\sqrt{u_0^2-1}}{u_0^2-\sqrt{u_0^2-1}} + \pi\right]. \quad (14)$$

Rezistența în alternativ R'_A, pe unitatea de lungime a plăcii de lățime semiinfinită este deci, în această aproximație

$$R'_a = \rho\sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}}\cdot\frac{\pi}{8u_0^2\Delta}\left[\ln(u_0 + \sqrt{u_0^2-1} + \frac{\pi}{2}\right] \quad (15)$$

și rezistența în alternativ R_a a întregii plăci, de lățime $2L$, are în aceeași aproximație expresia

$$R'_a = \frac{1}{2}R'_a = \rho\sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}}\,\frac{\pi}{16u_0^2\Delta}\left[\ln(u_0 + \sqrt{u_0^2-2} + \frac{\pi}{2}\right]. \quad (16)$$

Notînd cu R_c rezistența în curent continuu a plăcii

$$R_c = \frac{\rho}{4 L \Delta}, \tag{17}$$

factorul în alternativ al plăcii are în aproximația considerată expresia

$$k'_R = \frac{R'_a}{R_c} = \sqrt{\frac{\varkappa \mu \omega \sigma}{2}} \cdot \frac{\pi L}{4 u_0^2} \left[\ln (u_0 + \sqrt{u_0^2 - 1}) + \frac{\pi}{2} \right], \tag{18}$$

în care constanta u_0 este soluția ecuației (12 a).

Expresia (18) se poate pune sub forma următoare, în care intervine mărimea adimensională :

$$p = \sqrt{4 \mu \sigma \omega A}, \tag{19}$$

în care A este secțiunea barei

$$k'_R = \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot p \sqrt{\frac{2}{\Delta}} \cdot \frac{1}{u_0^2} \left[\ln (u_0 + \sqrt{u_0^2 - 1}) + \frac{\pi}{2} \right]_0 . \tag{18 a}$$

Dacă se notează

$$\Phi (u_0) = \frac{1}{u_0^2} \ln (u_0 + \sqrt{u_0^2 - 1}, \tag{18 b}$$

se obține pentru $\Phi (u_0)$ reprezentarea grafică în figura 6 și se obține pentru k'_R expresia

$$k'_R = \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\frac{L}{\Delta}} \cdot p \left[\Phi (u_0) + \frac{\pi}{2 u_0^2} \right]. \tag{18 c}$$

Această aproximație poate fi folosită cînd raportul L/Δ este destul de mare față de unitate. Cînd acest raport, scăzînd, se apropie de un număr mic de unități, aproximația care a condus la formulele (14) și deci (18) nu mai este suficientă. În adevăr, la raport L/Δ apropiat de unitate, repartiția intensității cîmpului magnetic pe jumătate din fețele laterale ale barei reale diferă sensibil de repartiția acestei intensități pe fețele laterale ale barei de lățime semiinfinită, într-o fișie de margine avînd lățimea egală cu jumătate din lățimea barei reale — și anume repartiția ei este mai puțin uniformă decît pe bara de lățime semiinfinită, așa încît formula (18) dă valori prea mici.

Se obține o altă aproximație, calculînd cum urmează afluxurile de putere activă prin cele patru fețe ale barei, cu ajutorul soluției pentru bara de lățime semiinfinită. Se aproximează afluxul de putere prin fiecare față de lățimea $2\ \Delta$ cu afluxul de putere prin fața de aceeași lățime a barei semiinfinite și avînd grosimea barei reale, iar afluxul de putere prin fiecare față de lățimea $2\ L$ se aproximează prin afluxul de putere prin fața de lățimea $2\ L$ a unei bare de lățime semiinfinită și avînd grosimea $2\ L$. Se obține astfel o aproximație care este mai bună pentru valori apropiate de unitate

ale raportului L/Δ, decît pentru valori mari ale acestui raport, fiindcă în acest ultim caz (fig. 3 c) aproximarea efectului fețelor laterale, de lățimi $2\ \Delta$, ale barei, prin efectul fețelor de lățime semiinfinită ale barei model

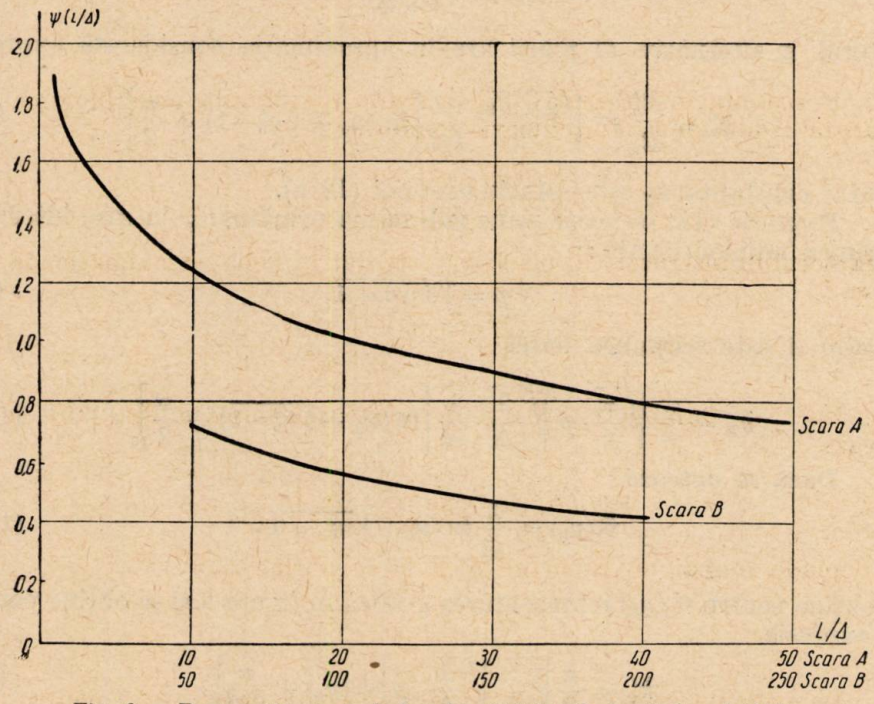


Fig. 6. — Reprezentarea grafică a funcției lui Cockroft $\psi = \psi(L/\Delta)$.

nu mai este suficientă. În această nouă aproximație avem pentru o față 2Δ și una $2\ L$.

$$P' = \rho\sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}}\,\frac{\pi I^2}{16}\left[\frac{1}{u_0'^2\Delta}\int_{-1}^{+1}\frac{\mathrm{d}\,u'}{\sqrt{1-u'^2}} + \frac{1}{u_0''^2 L}\int_{-1}^{+1}\frac{\mathrm{d}\,u''}{\sqrt{1-u''^2}}\right] =$$

$$= \rho\sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}}\,\frac{\pi^2 I^2}{16}\left[\frac{1}{u_0'^2\Delta} + \frac{1}{u_0''^2 L}\right], \qquad (14\,\mathrm{a})$$

în care u_0' este soluția ecuației

$$u_0'\sqrt{u_0'^2 - 1} - \ln\left(u_0' + \sqrt{u_0'^2 - 1}\right) - \frac{\pi}{2}\,\frac{L}{\Delta} = 0, \qquad (12\,\mathrm{a})$$

iar u_0'' este soluția ecuației

$$u_0''\sqrt{u_0''^2 - 1} - \ln\left(u_0'' + \sqrt{u_0''^2 - 1}\right) - \frac{\pi}{2}\,\frac{\Delta}{L} = 0. \qquad (12\,\mathrm{b})$$

Ecuaţiile (12 a) şi (12 b) se rezolvă cu ajutorul diagramelor din figura 5, în care pentru u_0' se operează cu $y_3' = \frac{\pi}{2}\frac{L}{\Delta}$, iar pentru u_0'' se operează cu $y_3'' = \frac{\pi}{2}\frac{\Delta}{L}$.

Rezistenţa în alternativ R_a'' a barei pe unitatea de lungime are în această de-a doua aproximaţie expresia

$$R_a'' = \rho\sqrt{\frac{\varkappa\mu w\sigma}{2}}\frac{\pi^2}{32}\left[\frac{1}{u_0'^2\Delta} + \frac{1}{u_0''^2 L}\right], \tag{16 a}$$

iar factorul în alternativ al plăcii k_R'' este dat în noua aproximaţie de expresia :

$$k_R'' = \frac{R_a''}{R_c} = \sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}}\cdot\frac{\pi^2}{32}\left[\frac{L}{u_0'^2} + \frac{\Delta}{u_0''^2}\right]. \tag{18 d}$$

Dacă în formula (18 d) se foloseşte mărimea p din (19) şi se notează

$$\Psi(L/\Delta) = \frac{1}{u_0'^2}\sqrt{\frac{L}{\Delta}} + \frac{1}{u_0''^2}\sqrt{\frac{\Delta}{L}}.$$

Ψ depinde numai de raportul L/Δ, şi se obţine

$$k_{R'}'' = \frac{\pi^2}{16}\sqrt{\frac{\pi}{2}}\,p\Psi\left(\frac{L}{\Delta}\right). \tag{18 e}$$

De exemplu, pentru barele cu secţiune pătrată ($L = \Delta$), pentru care $u_0' = u_0'' = u_0$, formulele (16 a), (18 d) şi (18 e) dau următoarele valori :

$$R_a'' = \frac{\pi^2\rho}{16}\sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}}\frac{1}{u_0^2 L}, \tag{16 b}$$

$$k_R'' = \sqrt{\frac{\varkappa\mu\omega\sigma}{2}}\cdot\frac{\pi^2}{4}\frac{L}{u_0^2}, \tag{18 f}$$

$$k_{R'}'' = \frac{\pi^2}{8}\sqrt{\frac{\pi}{2}}\frac{p}{u_0^2}. \tag{18 g}$$

4. *Verificarea experimentală a expresiilor factorului în alternativ.* A.E. Kennelly, F.A. Laws şi P.H. Pierce [4] au făcut determinări experimentale ale factorului în alternativ k_R pentru frecvenţe pînă la 5 000 Hz şi valori pînă la 3,9 ale mărimii p din formula (19), în care A este aria secţiunii barei şi care intervine ca mărime criterială în consideraţii de similitudine în refularea curentului. Kennelly şi Affel [5] au făcut determinări experimentale ale acestui factor pentru frecvenţe pînă la 10^5 Hz, pentru valori ale mărimii p pînă la 3,5,—H.C. Forbes şi L.G. Gorman [6] au făcut,

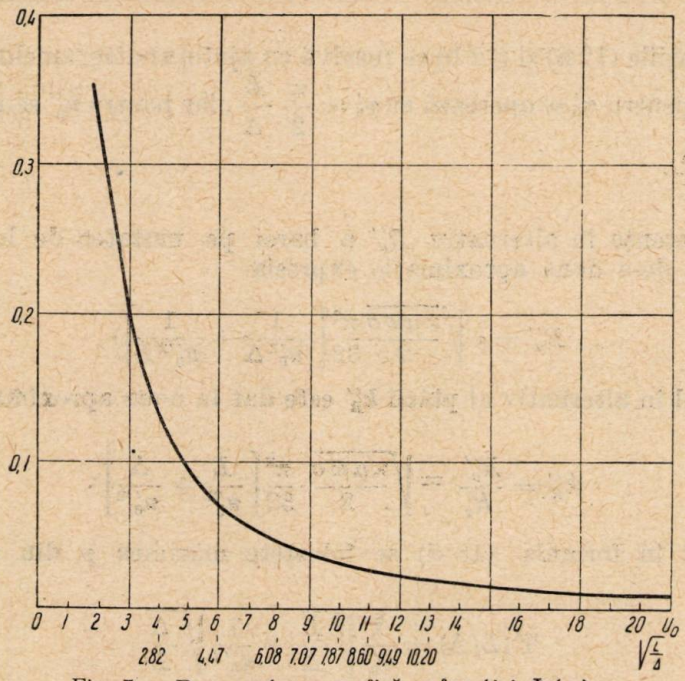


Fig. 7. — Reprezentarea grafică a funcţiei $\Phi(u_0) = \frac{1}{u_0^2} \ln(u_0 + \sqrt{u_0^2 - 1})$.

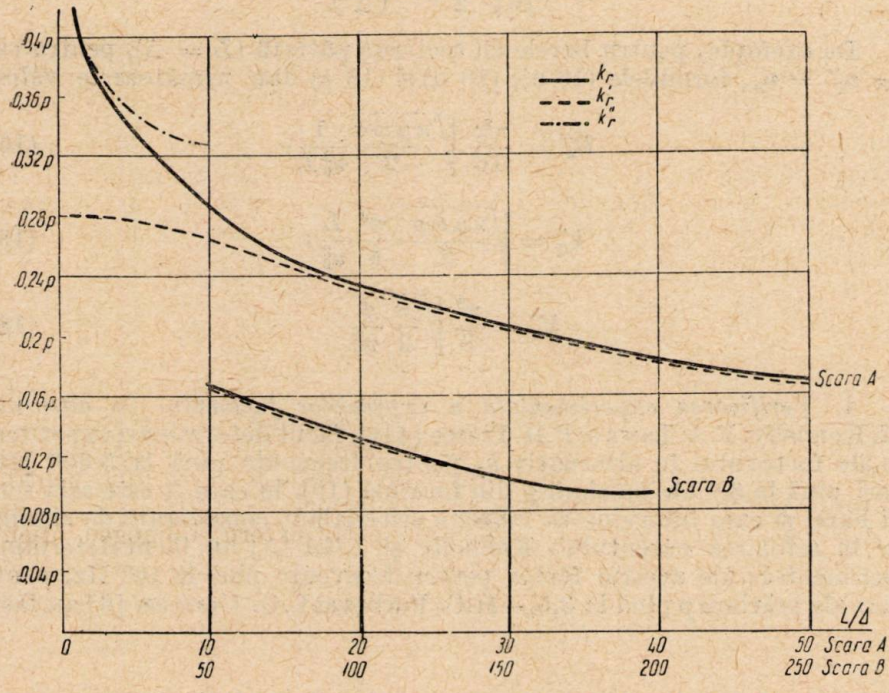


Fig. 8. — Factorul în alternativ al barelor de secţiune dreptunghiulară, experimental, Cockroft (k_R) şi după autori (k_R' şi k_R'').

de asemenea, determinări ale factorului în alternativ, și anume pentru frecvențe cuprinse între 22 și 287 kHz, la valori ale mărimii p pînă la 10, iar S. I. Haefner [7] a făcut ridicări ale aceluiași factor pentru secțiuni variate și frecvențe pînă la 8 000 Hz și a comparat rezultatele date, atît cu cele ale celorlalți experimentatori, cît și cu rezultatele teoretice ale lui Cockroft [8], folosind ca variabilă independentă mărimea p. Formula lui Cockroft pentru factorul în alternativ are forma

$$k_R = p\,\Psi\,(L/\Delta), \tag{18 h}$$

unde $\psi\,(L/\Delta)$ este o anumită funcție de raportul L/Δ dintre lățimea și grosimea barelor, dată de figura 7. Haefner a obținut o bună confirmare a expresiei lui Cockroft pentru acest factor. Pentru a verifica expresiile din formulele (18 a) și (18 e), stabilite de autori pentru factorul în alternativ, și a determina limitele aplicabilității lor, valorile date de aceste formule se pot compara și numai cu cele date de formula lui Cockroft.

Figura 8 reprezintă în funcție de raportul L/Δ factorii în alternativ ai barelor de secțiune dreptunghiulară atît după Cockroft (k_R din formula (18 h)) și experimente, cît și după autori — și anume k_R din formula (18) și k_R din formula (18 e).

Din compararea valorilor obținute, rezultă următoarele : Expresia k'_R din formula (18 a) a factorului în alternativ este aplicabilă pentru valori ale raportului L/Δ mai mari decît 6 iar expresia k''_R din formula (18 e) a factorului în alternativ este aplicabilă pentru valori ale raportului L/Δ mai mici decît 6, pînă la $L/\Delta = 1$, raport pentru care valoarea k''_R calculată coincide practic cu valoarea experimentală. Sub această valoare a raportului L/Δ sînt aplicabile aceleași expresii ale factorilor k'_R și k''_R după ce s-au intervertit între ele mărimile L și Δ.

Această bună coincidență între datele experimentale și cele teoretice îndreptățește pe autori să folosească o aproximație asemănătoare în studiul efectului de proximitate la barele de secțiune dreptunghiulară.

5. *Efectul de proximitate în bara conductoare plată, de secțiune dreptunghiulară, la refulare netă a curentului.* Dacă bara este situată într-un cîmp magnetic extern armonic, care în lipsa plăcii este uniform și formează unghiul α cu direcția pe care o determină în secțiunea dreaptă suprafața plată a plăcii (fig. 9) :

$$H = H_0 \sin \omega t, \tag{20}$$

se poate descompune intensitatea cîmpului magnetic în componente după direcțiile lățimii și grosimii plăcii, se consideră aceasta situată succesiv în cîmpurile magnetice avînd intensitatea orientată normal pe fața plăcii și pe muchea ei (fig. 9 *b* și *c*), iar apoi se poate aplica formula (4). La refulare netă a curentului cîmpul în exterior este potențial și tangent și deci se poate folosi iarăși teorema lui Schwartz-Christoffel, pentru a determina cîmpul prin reprezentare conformă.

În cazul plăcii situate în cîmp magnetic extern și omogen orientat după lățimea L a plăcii (fig. 10).

$$H_0 \cos \alpha \sin \omega t,$$

cîmpul magnetic din apropierea muchiilor plăcii poate fi exprimat prin cîmpul din exteriorul conturului Γz din figura 10, din apropierea muchiei lui. Cum în fenomene este importantă în special contribuția porțiunilor

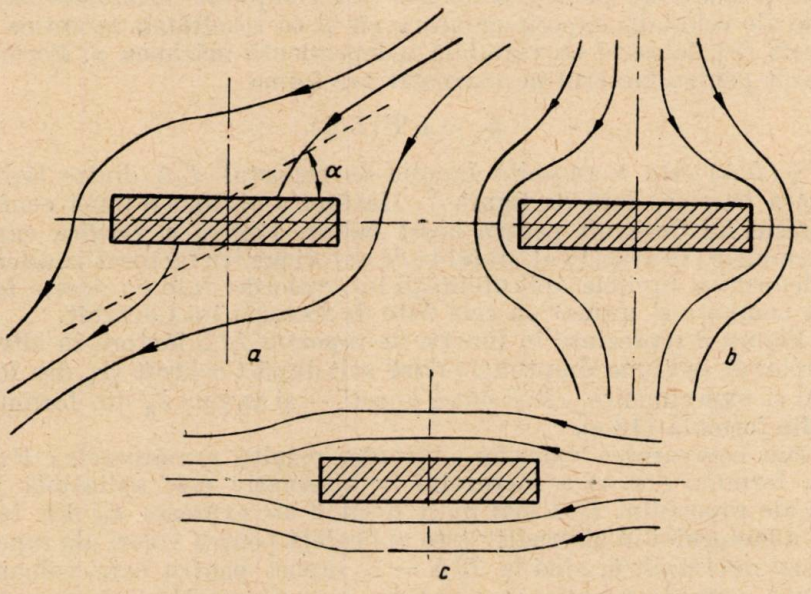


Fig. 9. — Descompunerea cîmpului magnetic de efect de proximitate (fig. 9*a*) în două cîmpuri componente (fig. 9*b* și 9c).

de placă din apropierea muchiilor ei și cum influența prezenței muchiilor asupra fenomenelor din mijlocul lățimii plăcii este neglijabilă, un sfert din absorbția de putere activă a plăcii poate fi aproximată prin absorbția părții din conturul Γ_z, care corespunde unui sfert din conturul plăcii, situat între planele ei de simetrie, perpendiculare unul pe altul.

Dacă A_∞ B, C, D sînt punctele corespunzătoare din cele două

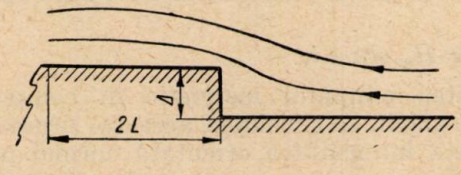


Fig. 10. — Cîmpul magnetic de efect de proximitate în apropiere de o muche a unei bare plate.

plane complexe z și w (fig. 11), transformarea Schwarz-Christoffel este dată de expresia

$$\frac{dz}{dw} = M\,(w+1)^{\frac{1}{2}}\,(w-1)^{-\frac{1}{2}} = M\frac{w+1}{\sqrt{w^2-1}}, \tag{21}$$

în care M este o constantă de integrare.

Integrînd ecuația, se obține transformarea

$$z = M\int \frac{w+1}{\sqrt{w^2-1}} = M\left\{\sqrt{w^2-1} + \ln\left(w+\sqrt{w^2-1}\right)\right\} + N$$

Din corespondența prin transformare a punctelor $B\ (0,j\Delta)$ și $C\ (0,0)$ în cele două plane z și w, se obține

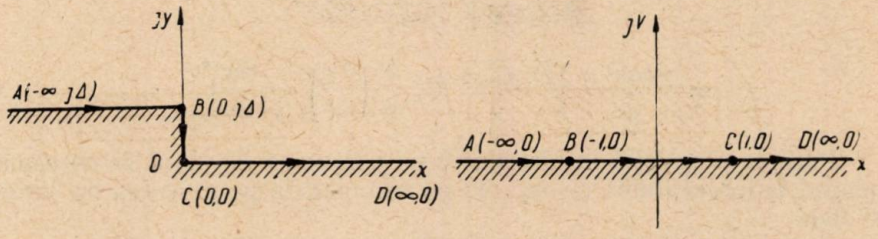


Fig. 11. — Reprezentarea conformă folosită pentru rezolvarea problemei de efect de proximitate cu refulare netă a curentului.

$$M = \frac{\Delta}{\pi}\ ;\ N = 0,$$

astfel încît transformarea devine

$$z = \frac{\Delta}{\pi}\left\{\sqrt{w^2-1} + \ln\ (w+\sqrt{w^2-1})\right\}. \tag{22}$$

Funcția complexă care determină cîmpul H va fi

$$V = Kz = \frac{K\Delta}{\pi}\left\{\sqrt{w^2-1} + \ln\left(\sqrt{w^2-1}+w\right)\right\}, \tag{23}$$

în care constanta K urmează să fie determinată din condițiile problemei.

Intensitatea H a cîmpului magnetic rezultă din expresia (6 a) și este

$$H = K\frac{dw}{dz} = K\frac{\pi}{\Delta}\sqrt{\frac{w-1}{w+1}}\ . \tag{24}$$

La infinit însă cîmpul este uniform și egal cu $H_0\cos\alpha$, adică

$$\lim_{w\to\infty} H = \lim_{w\to\infty} K\frac{\pi}{\Delta}\sqrt{\frac{w-1}{w+1}} = \frac{K\pi}{\Delta} = H_0\cos\ \alpha,$$

de unde rezultă valoarea constantei K.

$$K = H_0\frac{\Delta}{\pi}\cos\alpha.$$

Intensitatea H a cîmpului magnetic este deci

$$H = H_0 \frac{\Delta \cos \alpha}{\pi} \frac{dw}{dz} = H_0 \frac{\Delta \cos \alpha}{\pi} \sqrt{\frac{w-1}{w+1}}.$$

Vectorul lui Poynting S are deci expresia

$$S = \frac{\rho}{\chi^2} \sqrt{\frac{\varkappa \mu \omega \sigma}{2}} H^2 =$$

$$= \frac{\rho \cos^2 \alpha}{\varkappa^2} \sqrt{\frac{\varkappa \mu \omega \sigma}{2}} H_0^2 \frac{\Delta^2}{\pi^2} \left(\frac{dw}{dz}\right)_{v=0} \left(\frac{dw}{dz}\right)^*_{v=0}. \tag{25}$$

Puterea absorbită în alternativ pe porțiunea de placă ce corespunde în planul w intervalului $(-u_0, 1)$ pe axa reală și pe unitatea de lungime este deci

$$P'_a = \frac{\rho \cos^2 \alpha}{\varkappa^2} \sqrt{\frac{\varkappa \mu \omega \sigma}{2}} H_0^2 \frac{\Delta^2}{\pi^2} \int_{-u_0}^{1} \left(\frac{dw}{dz}\right)_{v=0} \left(\frac{dw}{dz}\right)^*_{v=0} dz =$$

$$= \frac{\rho \cos^2 \alpha}{\varkappa^2} \sqrt{\frac{\varkappa \mu \omega \sigma}{2}} H_0^2 \frac{\Delta^2}{\pi^2} \int_{-u_0}^{0} \sqrt{\frac{u-1}{u+1}}\, du,$$

iar puterea totală $P_a = 4P'$ are expresia.

$$P_a = H_0^2 \cos^2 \alpha \frac{4\rho\Delta^2}{\pi^2} \sqrt{\frac{\varkappa \mu \omega \sigma}{2}} \left[\sqrt{u_0^2 - 1} + \ln\left(u_0 + \sqrt{u_0^2 - 1} + \pi\right)\right], \tag{26}$$

în care constanta u_0 este rădăcina următoarei ecuații :

$$z = \frac{\Delta}{\pi} \left\{\sqrt{w^2 - 1} + \ln\left(w + \sqrt{w^2 - 1}\right)\right\},$$

în care se ia $z = -L + j\Delta$ și $w = -u_0 + j\,0$. Prin aceasta, ecuația devine

$$-L + j\Delta = \frac{\Delta}{\pi} \left\{\sqrt{u_0^2 - 1} + \ln\left(-u_0 + \sqrt{u_0^2 - 1}\right)\right\}.$$

Argumentul $-u_0 + \sqrt{u_0^2 - 1}$ fiind negativ, se poate scrie

$$-u_0 + \sqrt{u_0^2 - 1} = \left(-\sqrt{u_0^2 - 1} + u_0\right) e^{j\pi} \text{ și deci}$$

$$\ln\left(u_0 + \sqrt{u_0^2 - 1}\right) = -\ln\left(\sqrt{u_0^2 - 1} + u_0\right) + j\pi.$$

Introducînd această expresie în ecuația de mai sus, se obține pentru u_0 :

$$-L + j\Delta = \frac{\Delta}{\pi} \left\{\sqrt{u_0^2 - 1} - \ln\left(\sqrt{u_0^2 - 1} + u_0\right) + j\pi.\right\}$$

Reţinînd părţile reale, se obţine pentru u_0 condiţia :

$$L = \frac{\Delta}{\pi}\left\{\sqrt{u_0^2 - 1} - \ln\left(\sqrt{u_0^2 - 1} + u_0\right)\right\}. \qquad (27)$$

în care s-a schimbat semnul atît în (26) cît şi în (27).

Această ecuaţie pentru u_0 se rezolvă ca şi ecuaţia (19).

Efectul de proximitate pentru placa situată în cîmpul magnetic orientat după grosimea Δ a plăcii se obţine analog, aproximînd cîmpul magnetic exterior prin cîmpul magnetic din exteriorul unui contur ca în figura 11, însă avînd înălţimea de treaptă L.

Această aproximaţie este mai slabă decît cea precedentă, fiindcă prezenţa muchiilor plăcii are influenţă mai mare asupra fenomenelor de la mijlocul grosimii decît asupra celor de la mijlocul lăţimii plăcii. Puterea corespunzătoare se obţine deci, în această aproximaţie mai slabă, din (26), schimbînd pe L cu Δ, pe Δ cu L şi pe $\cos\alpha$ cu $\sin\alpha$, atît în (25), cît şi în (26).

Adunînd aceste ultime două puteri, se obţine o aproximaţie pentru puterea absorbită de placă prin efect „omogen" de proximitate, într-un cîmp magnetic exterior care are intensitatea efectivă H_0.

Conform formulei (4), această putere se adună cu dublul puterii (14) cînd placa este parcursă de curent de aducţie şi prezintă şi efect de proximitate.

RANDWIRKUNG UND NÄHEEINFLUSS IN STROMSCHIENEN VON RECHTECKIGEM QUERSCHNITT BEI AUSGEPRÄGTER STROMVERDRÄNGUNG

ZUSAMMENFASSUNG

Durch die bekannte Behandlung als äußeres Problem in einem ebenen Laplaceschen magnetischen Felde, werden zwei Näherungsformeln für die ausgeprägte Stromverdrängung nicht nur in Richtung der Dicke Δ, sondern auch in Richtung der Breite L der Stromschienen von rechteckigem Querschnitt aufgestellt. Hierzu wird einmal die Angleichung der Vorgänge in der einerseits der Quer-Symmetrieebene der Schiene liegenden Hälfte, an die Vorgänge in einem Randstreifen von halber Schienenbreite einer Platte von der Dicke der Schiene und von „halbunendlicher" Breite benutzt. Unter Verwendung einer leicht durchzuführenden konformen Abbildung wird für den Wechselstrom-Faktor der Schiene, d.h. für das Verhältnis des Wechselstromwiderstandes bei sinusförmigem Wechselstrom zum Gleichwiderstand ein Ausdruck (18) abgeleitet, der nach Versuchsergebnissen bei Schienen mit $L/\Delta \geqslant 6$ verwendet werden kann. Gleicht man dann nacheinander die Vorgänge in jeder der Flächen Δ und L den Vorgängen in der Fläche in Richtung der Dicke Δ bzw.

L einer Platte von „halbunendlicher" Breite an, so erhält man für den Wechselstrom-Faktor der Schiene den Ausdruck (18 d), welcher nach Versuchsergebnissen für Schienen mit $1 \leqslant L/\Delta \leqslant 6$ verwendet werden kann. Auf diese Weise wird der gesamte Bereich der möglichen Formate der Querschnitte rechteckiger Schienen gedeckt.

Um den zusätzlichen, durch den Einfluß der Nähe bedingten Leistungsverlust zu erhalten, werden die zwei bei ausgeprägter Stromverdrängung (Formel 2b) bedingten Leistungen berechnet und summiert, die je einem homogenen äußeren Feld entsprechen, dessen Feldstärke gleich ist je einer Komponente des den Einfluß der Nähe berücksichtigenden äußeren homogenen magnetischen Feldes nach den zwei Symmetrieebenen. Die erhaltene Summe wird mit dem durch die elektrokalorische Wirkung des Zuleitungsstromes bedingten Leistungsverlust addiert (gemäß einem in der Abhandlung bewiesenen Satz).

BIBLIOGRAFIE

1. REMUS RĂDULEȚ, *Bazele teoretice ale electrotehnicii*. **IV**. Tipografia Min. Inv., București, 1956.
2. H. SCHWENKLAGEN, *Untersuchungen über Stromverdrängung in rechteckigen Querschnitten*. Archiv für Elektrotechnik, **XVII**, *37* (1927).
3. S. KOHRT, *Sur les méthodes de calcul des pertes supplémentaires dans les conducteurs non magnétiques parcourus par un courant alternatif sinusoïdal*. Bull. Soc. française des électriciens, **9**, *5*, 237 (1939).
4. A. E. KENNELLY, F. A. LAWS, P. H. PIERCE, *Experimental researches on skin effect in conductors*. Trans. A.I.E.E., **34**, part. II, 1953, september (1915).
5. A. E. KENNELLY, I. AFFEL, *Skin effect resistance measurements of conductors to 10C kilocycles*. Proc. I.R.E., **4**, 523, December (1916).
6. H. C. FORBES, L. J. GORMAN, *Skin effect in rectangular conductors*. Trans A.I.E.E., **52**, 516, June (1933).
7. S. I. HAEFNER, *Alternating-current resistance of rectangular conductors*. Proc. I.R.E., **25**, 434 (1937).
8. J. D. COCKROFT, *Skin effect in rectangular conductors at high frequency*. Proc. I.R.E., **12**, 533 (1929).

REGIMUL TRANZITORIU ÎN ÎNCĂLZIREA ELECTRICĂ A BARELOR OMOGENE PE PORȚIUNI

DE

Acad. REMUS RĂDULEȚ și AL. TIMOTIN

538.542 : 621.315.513

1. PROBLEMA ÎNCĂLZIRII

Repartiția în spațiu și evoluția în timp a temperaturii unui conductor electric omogen pe porțiuni și încălzit prin rezistență intervine în problema privitoare la sudarea în capete a șinelor de cale ferată [1], la termobimetale [2], [3], [4], la comportarea termică a unor elemente de mașini și aparate electrice, cum sînt contactele electrice frontale [5], [6], [7], circuitele magnetice ale mașinilor și aparatelor electrice [8], [9] etc. Problema determinării repartiției în spațiu a temperaturii în regimul staționar e rezolvată în condiții suficient de generale [1], [2], [5], [11]; obținerea soluției respective nu prezintă dificultăți deosebite. Probleme particulare de regim tranzitoriu în medii neomogene sînt rezolvate în monografii privind conducția căldurii [11], în literatura tehnică de specialitate însă se folosesc numai metode de aproximare [1], [2], [8], [9]. Deși în calculele tehnice metodele exacte, aplicabile unor configurații geometrice idealizate, se înlocuiesc cu metode de aproximare, cunoașterea soluției exacte a unei clase destul de largi de astfel de probleme prezintă importanță teoretică și practică, fiindcă permite determinarea erorilor implicate de metodele de aproximare și deschide posibilitatea rezolvării numerice exacte, de exemplu cu ajutorul calculatoarelor electronice, care permit tabelarea rezultatelor și întocmirea de nomograme utilizabile direct în calcule.

Prezentăm mai jos metoda funcțiunilor proprii pentru determinarea soluției explicite a problemei încălzirii electrice în regim tranzitoriu a unei bare conductoare formate din două părți omogene diferite și puse în contact termic, model idealizat aplicabil problemelor studiate în lucrări ca [1], [2] și [6], cu posibilitatea de extindere și la cazul a n părți omogene, analog cu problema celor n corpuri [8], iar apoi o aplicăm cazului unui inel bimetalic. În alt loc, tratăm acest caz și cu ajutorul transformării Laplace.

2. BAZELE CALCULULUI ȘI SIMPLIFICĂRI

Considerăm o bară conductoare subțire, dreaptă sau de curbură mică, de lungime $L = L_1 + L_2$, constituită din două porțiuni omogene, de lungimi L_1 și L_2, de arii ale secțiunii transversale A_1 și A_2 și de perimetri ai acestei secțiuni p_1 și p_2, dispuse în prelungire, în contact termic și electric una cu alta — și străbătută în lung de un curent electric de valoare efectivă I, presupus uniform repartizat pe secțiunea barei (fig. 1). Cu indicii $i = 1$ și $i = 2$ pentru mărimile referitoare la cele două porțiuni, folosim următoarele notații pentru porțiunea (i) : γ_i [J·cm^{-3}·grd^{-1}] pentru căldura specifică volumică a materialului, respectiv egală cu produsul dintre căldura specifică și densitate; λ_i [W·cm^{-1}·grd^{-1}] pentru conductivitatea termică a materialului; α_i [W·cm^{-2}·grd^{-1}] pentru coeficientul de transfer al căldurii prin suprafața laterală; ρ_i [Ωcm] pentru rezistivitatea materialului; $\Pi_i = \rho_i (I : A_i)^2$ pentru pierderile în unitatea de volum a materialului; P_j [W] pentru pierderile în eventualele rezistențe de contact ale feței frontale (egale cu produsul rezistenței de contact prin pătratul valorii efective a curentului I), cum și P_{12} [W] pentru pierderile în rezistența de

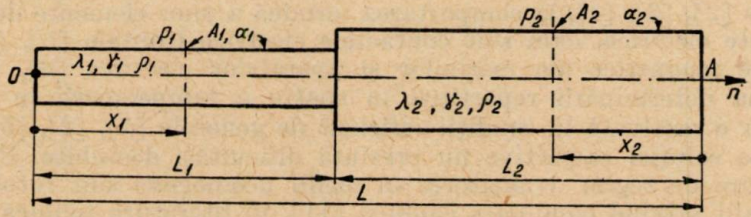


Fig. 1. — Bară subțire conductoare omogenă pe două porțiuni.

contact a celor două porțiuni. Puterile P_j și P_{12} pot include și eventualele efecte Peltier. Neglijînd neuniformitățile temperaturii în secțiunile transversale ale barei, supratemperatura $\Theta = \Theta(x, t)$ [grd = °C] față de mediul ambiant, asimilat unui termostat, care urmează să fie determinată în condițiile inițiale și la limită date, va depinde de abscisa x[cm] a secțiunii față de extremitatea 0 din stînga barei, cum și de timpul t [s].

Din legea *conducției căldurii* în condițiile indicate mai sus rezultă pentru porțiunile (i) ecuațiile

$$\gamma_i A_i \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \lambda_i A_i \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \lambda^2} - \alpha_i p_i \Theta + \Pi_i A_i, \quad (i = 1, 2), \tag{1}$$

integrala $\Theta(x, t)$ a acestei ecuații fiind căutată pentru $t \geqslant 0$ cu condiția inițială

$$\Theta(x, 0) = F(x); \quad t \geqslant 0, \tag{2}$$

cu condițiile de trecere între porțiunile omogene

$$(\Theta(x, t))_{x=L_1-0} = (\Theta(x, t))_{x=L_1+0},$$

și

$$P_{12} - \lambda_1 A_1 \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x=L_1-0} = -\lambda_2 A_2 \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x=L_1+0} \tag{3}$$

și cu condițiile la limită care, într-o formă destul de cuprinzătoare, au expresiile

$$\begin{cases} -\lambda_1 A_1 \left(\dfrac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x=0} + a_1(\Theta(x, t))_{x=0} = P_1; \quad t \geqslant 0; \\ -\lambda_2 A_2 \left(\dfrac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x=L_1+L_2} + P_2 = a_2(\Theta(x, t))_{x=L_1+L_2}; \quad t \geqslant 0, \end{cases} \tag{4}$$

în care coeficienții pozitivi $a_i > 0$ $(i = 1, 2)$ au rolul unor conductanțe termice. Toate dimensiunile și mărimile de material fiind pozitive, scrierea relațiilor (1) ... (4) se simplifică dacă se introduc mărimile

$$\beta_i = \sqrt{\frac{\alpha_i p_i}{\lambda_i A_i}} > 0 \,[\mathrm{cm}^{-1}], \tag{5}$$

ca reciproca unei lungimi caracteristice porțiunii (i),

$$\tau_i^0 = \frac{\gamma_i A_i}{\alpha_i p_i} > 0 \,[\mathrm{s}], \tag{6}$$

ca o constantă de timp caracteristică porțiunii (i),

$$\Theta_i^0 = \frac{\Pi_i A_i}{\alpha_i p_i} = \rho_i \frac{I^2}{\alpha_i p_i A_i} > 0 \,[\mathrm{grd}], \tag{7}$$

ca temperatură caracteristică porțiunii (i) : temperatura de regim staționar la conductivitate termică infinită, cum și

$$\sigma_i = \lambda_i A_i > 0 \,[\mathrm{W \cdot cm \cdot grd^{-1}}], \tag{8}$$

drept conductanță termică lineică a porțiunii (i).

Se obțin astfel ecuațiile

$$\tau_i^0 \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{1}{\beta_i^2} \cdot \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} - [\Theta - \Theta_i^0), \quad (i = 1,2), \tag{9}$$

cu condiția inițială (4) și cu condițiile de trecere și la limită ($t \geqslant 0$) :

$$(\Theta(x, t))_{x=L_1-0} = (\Theta(x, t))_{x=L_1+0}; \; \sigma_1 \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x=L_1-0} - \sigma_2 \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x=L_1+0} = P_{12},$$

și (10)

$$\left(-\sigma_1 \frac{\partial \Theta}{\partial x} + a_1 \Theta\right)_{x=0} = P_1; \left(\sigma_2 \frac{\partial \Theta}{\partial x} + a_2 \Theta\right)_{x=L_1+L_2} = P_2. \tag{11}$$

Vom folosi și o notație compactă a parametrilor caracteristici τ_i^0, β_1, σ_i etc. ai celor două porțiuni, considerîndu-i funcțiuni „treaptă" de variabila x, de tipul

$$\tau^0(x) = \begin{cases} \tau_1^0 \text{ pentru } 0 \leqslant x < L_1; \\ \tau_2^0 \text{ pentru } L_1 < x \leqslant L_1 + L_2; \end{cases} \tag{12}$$

$$\beta(x) = \begin{cases} \beta_1 \text{ pentru } 0 \leqslant x < L_1; \\ \beta_2 \text{ pentru } L_1 < x \leqslant L_1 + L_2; \end{cases} \tag{13}$$

$$\sigma(x) = \begin{cases} \sigma_1 \text{ pentru } 0 \leqslant x < L_1; \\ \sigma_2 \text{ pentru } L_1 < x \leqslant L_1 + L_2. \end{cases} \tag{14}$$

Ecuația (9) fiind liniară, vom căuta o soluție de forma sumei

$$\Theta(x, t) = T(x) + \vartheta(x, t), \tag{15}$$

dintre o funcțiune „staționară" $T(x)$ — soluție particulară a ecuației neomogene (9), cu condițiile de trecere (10) și la limită (11) de asemenea neomogene — și o funcțiune $\vartheta(x, t)$, soluție a ecuației omogene

$$\tau^0 \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - \vartheta, \tag{16}$$

cu următoarele condiții de trecere și la limită omogene

$$[\vartheta(x, t)]_{x=L_1-0} = [\vartheta(x, t)]_{x=L_1+0}; \; \sigma_1 \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x=L_1-0} = \sigma_2 \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x=L_1+0} \tag{17}$$

și

$$\left[-\sigma_1 \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + a_1 \vartheta(x, t)\right]_{x=0} = 0; \left[\sigma_2 \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + a_2 \vartheta(x, t)\right]_{x=L_1+L_2} = 0, \tag{18}$$

și cu condiția inițială

$$\vartheta(x, 0) = \Theta(x, 0) - T(x) = F(x) - T(x). \tag{19}$$

Se constată imediat că în aceste condiții toate relațiile (2), (9), (10), (11), sînt satisfăcute. Funcțiunea $T(x)$ e soluția în regim permanent, a cărei

determinare e cunoscută, iar funcțiunea $\vartheta(x, t)$ e soluția în regim liber, a cărei determinare se va face cu metoda separării variabilelor, folosind funcțiuni proprii definite în întregul interval ($0 \leqslant x \leqslant L_1 + L_2$) și a căror derivată prezintă o discontinuitate de primă specie în punctul $x = L_1$, ortogonalizarea acestor funcțiuni proprii fiind obținută prin alegerea unei funcțiuni-pondere convenabile.

Funcțiunile necunoscute de x din soluția problemei vor purta uneori indicii 1 și 2, după cum corespund valorilor variabilei x în subintervalele $(0, L_1)$ și $(L_1, L_1 + L_2)$. În acest caz, notațiile vor fi

$$\begin{cases} x_1 = x;\ \vartheta_1(x_1, t) = \vartheta(x, t);\quad T_1(x_1) = T(x) \text{ pentru } 0 \leqslant x < L_1; \\ x_2 = L_1 + L_2 - x;\ \vartheta_2(x_2, t) = \vartheta(x, t);\quad T_2(x_2) = T(x) \text{ pentru } L_1 \leqslant x \leqslant L_1 + L_2, \end{cases} \tag{20}$$

astfel că $0 \leqslant x_i \leqslant L_i$, $(i = 1, 2)$, — scriere care conduce la relații asemănătoare în cele două subintervale.

3. INTEGRALA T (x) A ECUAȚIEI (9) PENTRU REGIMUL STAȚIONAR

Funcțiunea $T(x)$ fiind independentă de timp, satisface în fiecare subinterval (i) ecuația

$$T_i - \frac{1}{\beta_i^2} \frac{\mathrm{d}^2 T_i}{\mathrm{d}x_i^2} = \Theta_i^0, \tag{21}$$

cu soluția generală

$$T_i(x_i) = \Theta_i^0 + A_i \operatorname{sh} \beta_i x_i + B_i \operatorname{ch} \beta_i x_i; \quad (i = 1,2). \tag{22}$$

Pentru a determina constantele A_1, A_2, B_1, B_2, se utilizează condițiile de trecere (10) și condițiile la limită (11), în care se substituie $\Theta(x, t) = T_i(x_i)$. Cu (20), aceste condiții devin

$$T_1(L_1) = T_2(L_2); \quad \sigma_1 T_1'(L_1) + \sigma_2 T_2'(L_2) = P_{12}; \tag{23}$$

$$-\sigma_1 T_1'(0) + a_1 T_1(0) = P_1; \quad -\sigma_2 T_2'(0) + a_2 T_2(0) = P_2. \tag{24}$$

Substituind relațiile (22) în (23) și (24), se obțin patru relații lineare și neomogene, cu patru necunoscute A_1, A_2, B_1, B_2, a căror rezolvare conduce la următoarele expresii:

$$A_1 \cdot \Delta = \Theta_2^0 \delta_2 \cdot \operatorname{cth} \varepsilon_2 \cdot [\operatorname{sh}(\beta_2 L_2 + \varepsilon_2) - \operatorname{sh} \varepsilon_2] +$$

$$+ \Theta_1^0 \delta_2 \cdot \operatorname{cth} \varepsilon_2 \cdot \left[\operatorname{sh}(\beta_2 L_2 + \varepsilon_2) \cdot (\operatorname{ch} \beta_1 L_1 - 1) + \frac{\delta_1 \operatorname{ch} \varepsilon_1}{\delta_2 \operatorname{ch} \varepsilon_2} \operatorname{sh} \beta_1 L_1 \cdot \operatorname{ch}(\beta_2 L_2 + \varepsilon_2) \right] +$$

$$+ P_{12} \frac{\operatorname{ch}(\beta_2 L_2 + \varepsilon_2)}{\operatorname{sh} \varepsilon_2} + \tag{25}$$

$$+ P_2 \operatorname{cth} \varepsilon_2 - P_1 \frac{\delta_2 \operatorname{ch} \varepsilon_2 \cdot \operatorname{ch} \beta_1 L_1 \cdot \operatorname{sh}(\beta_2 L_2 + \varepsilon_2) + \delta_1 \operatorname{ch} \varepsilon_1 \cdot \operatorname{sh} \beta_1 L_1 \cdot \operatorname{ch}(\beta_2 L_2 + \varepsilon_2)}{\delta_1 \operatorname{sh} \varepsilon_1 \operatorname{sh} \varepsilon_2}$$

$$B_1 = \frac{P_1}{a_1} - \Theta_1^0 + \operatorname{cth} \varepsilon_1 \cdot A_1 \tag{26}$$

în care s-au folosit relațiile și notațiile

$$\delta_i = \sqrt{\sigma_i^2 \beta_i^2 - a_i^2}\ ;\ \operatorname{sh}\varepsilon_i = \frac{a_i}{\delta_i}\ ;\ \operatorname{ch}\varepsilon_i = \frac{\sigma_i \beta_i}{\delta_i};\ (i = 1,\ 2) \tag{27}$$

și

$$\Delta = \frac{1}{\operatorname{sh}\varepsilon_1 \cdot \operatorname{sh}\varepsilon_2}\Big[\delta_2 \operatorname{ch}\varepsilon_2 \cdot \operatorname{sh}(\beta_2 L_2 + \varepsilon_2) \cdot \operatorname{ch}(\beta_1 L_1 + \varepsilon_1) + \\ + \delta_1 \operatorname{ch}\varepsilon_1 \cdot \operatorname{sh}(\beta_1 L_1 + \varepsilon_1) \cdot \operatorname{ch}(\beta_2 L_2 + \varepsilon_2)\Big] \tag{28}$$

Constantele A_2 și B_2 sînt date de expresii similare cu (25) și (26), în care indicii 1 și 2 se permută între ei.

4. INTEGRALA CARACTERISTICĂ PENTRU REGIMUL LIBER

Funcțiunea $\vartheta(x, t)$, caracteristică regimului liber, este soluția ecuației omogene

$$\tau^0 \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{1}{\beta_2} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - \vartheta, \tag{29}$$

cu condiția inițială (19) și cu condiții de trecere (17) și la limita (18) omogene. Soluțiile particulare, de forma

$$\vartheta(x,\ t) = \varphi(x)\, \psi(t), \tag{30}$$

caracteristice pentru metoda separării variabilelor, satisfac cu (29) ecuația

$$\frac{1}{\psi} \frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\tau^0 \beta^2} \frac{1}{\varphi} \frac{\mathrm{d}^2\varphi}{\mathrm{d}x^2} - \frac{1}{\tau^0} = \text{const.} \tag{31}$$

(deoarece primul membru depinde numai de t, iar al doilea numai de x), în care τ^0 și β sînt funcțiile „treaptă" (12), (13).

Cum vom demonstra ulterior, constanta care a intervenit mai sus e negativă; ea va fi notată cu $-1/\tau$. Ecuația pe care o satisface funcția temporală $\psi(t)$ are coeficienți constanți și se integrează imediat. Înglobînd constanta de integrare în funcția spațială $\varphi(x)$, rezultă că soluțiile elementare (30) au în fiecare subinterval $i = 1, 2$, cu (20), forma

$$\vartheta_i(x_i, t) = \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \varphi_i(x_i), \tag{32}$$

unde $\varphi_i(x_i)$ sînt soluțiile ecuațiilor de valori proprii

$$\mathfrak{L}_i(\varphi_i) \equiv \frac{1}{\tau_i^0 \beta_i^2} \frac{\mathrm{d}^2\varphi_i}{\mathrm{d}x_i^2} - \frac{1}{\tau_i^0} \varphi_i = -\frac{1}{\tau} \varphi_i, \tag{33}$$

iar

$$\varphi_1(x_1) = \varphi(x) \text{ cu } 0 \leqslant x < L_1\ ;\ \varphi_2(x_2) = \varphi_2(L_1 + L_2 - x) = \\ = \varphi(x) \text{ cu } L_1 < x \leqslant L_1 + L_2. \tag{34}$$

Valorile proprii $1/\tau$, respectiv constantele de timp τ, sînt independente de intervalul i considerat, pentru ca să poată fi satisfăcute identic (la orice t) condițiile (17) și (18). Aceste valori se determină chiar prin ultimele condiții, care, scrise pentru funcțiunile proprii $\varphi_i\ (x_i)$, devin :

$$\varphi_1(L_1) = \varphi_2(L_2);\ \sigma_1\,\varphi_1'(L_1) + \sigma_2\,\varphi_2'(L_2) = 0; \tag{35}$$

$$-\sigma_1\,\varphi_1'(0) + a_1\,\varphi_1(0) = 0;\ -\sigma_2\,\varphi_2'(0) + a_2\,\varphi_2(0) = 0. \tag{36}$$

Notînd

$$\mu_1 = \beta_1\sqrt{\frac{\tau_1^0}{\tau} - 1};\quad \mu_2 = \beta_2\sqrt{\frac{\tau_2^0}{\tau} - 1}, \tag{37}$$

ecuațiile (33) devin

$$\frac{\mathrm{d}^2\varphi_i}{\mathrm{d}x_i^2} = -\mu_i^2\,\varphi_i \tag{38}$$

și au soluții generale de forma

$$\varphi_i(x_i) = C_i \sin\mu_i x_i + D_i\cos\mu_i x_i. \tag{39}$$

Condițiile (35) și (36) se formulează atunci explicit cum urmează :

$$\begin{cases} C_1\sin\mu_1L_1 + D_1\cos\mu_1L_1 - C_2\sin\mu_2L_2 - D_2\cos\mu_2L_2 = 0; \\ C_1\sigma_1\mu_1\cos\mu_1L_1 - D_1\sigma_1\mu_1\sin\mu_1L_1 + C_2\sigma_2\mu_2\cos\mu_2L_2 - D_2\sigma_2\mu_2\sin\mu_2L_2 = 0; \\ -C_1\sigma_1\mu_1 + D_1a_1 = 0; \\ -C_2\sigma_2\mu_2 + D_2a_2 = 0. \end{cases} \tag{40}$$

Acest sistem linear și omogen în C_1, D_1, C_2, D_2 poate avea soluții nenule numai dacă determinantul său este nul. Prin (37), determinantul e o funcțiune de valoarea proprie $1/\tau$. Există, deci, soluții nenule ale ecuațiilor (33) numai pentru valorile constantei de timp τ care sînt rădăcini ale ecuației obținute prin anularea determinantului sistemului (40)

$$(a_1 + a_2)\,\sigma_1\mu_1\,\sigma_2\,\mu_2\cos\mu_1L_1\cos\mu_2L_2 - (a_2\sigma_1^2\mu_1^2 + a_1\sigma_2^2\mu_2^2)\sin\mu_1L_1\sin\mu_2L_2 +$$
$$+\sigma_2\,\mu_2\,(a_1a_2 - \sigma_1^2\mu_1^2)\sin\mu_1L_1\cos\mu_2L_2 + \sigma_1\mu_1\,(a_1a_2 - \sigma_2^2\mu_2^2)\cos\mu_1L_1\sin\mu_2L_2 = 0. \tag{41}$$

Introducînd notațiile

$$\sin\eta_i = \frac{a_i}{\sqrt{\sigma_i^2\,\mu_i^2 + a_i^2}};\quad \cos\eta_i = \frac{\sigma_i\mu_i}{\sqrt{\sigma_i^2\,\mu_i^2 + a_i^2}};\ (i = 1,\ 2), \tag{42}$$

ecuația precedentă ia următoarea formă compactă

$$\sigma_1\,\mu_1\cos(\mu_2L_2 - \eta_2)\sin(\mu_1L_1 - \eta_1) + \sigma_2\mu_2\cos(\mu_1L_1 - \eta_1)\sin(\mu_2L_2 - \eta_2) = 0, \tag{43}$$

care este ecuația valorilor proprii a problemei la limită considerate. Rădăcinile ei $\tau^{(1)}$, $\tau^{(2)}$, ..., $\tau^{(k)}$, ... sînt constantele de timp caracteristice pro-

blemei. Cu (40), funcțiunile proprii (41) sînt determinate pînă la un factor constant K și se pot pune sub forma ($i = 1, 2$)

$$\varphi_i(x_i) = \frac{K}{a_i \sin \mu_i L_i + \sigma_i \mu_i \cos \mu_i L_i}(a_i \sin \mu_i x_i + \sigma_i \mu_i \cdot \cos \mu_i x_i). \quad (44)$$

Unei valori proprii date $1/\tau^{(k)}$îi corespund anumite valori

$$\mu_1^{(k)} = \beta_1 \sqrt{\frac{\tau_1^0}{\tau^{(k)}} - 1}; \quad \mu_2^{(k)} = \beta_2 \sqrt{\frac{\tau_2^0}{\tau^{(k)}} - 1}, \quad (45)$$

cum și anumite valori $\eta_i^{(k)}$, date de (42), și o anumită funcție proprie $\varphi^{(k)}(x)$, definită în întregul interval $(0, L)$ de relațiile următoare

$$\varphi^{(k)}(x) = \begin{cases} \varphi_1^{(k)}(x_1) = \dfrac{K^{(k)}}{a_1 \sin \mu_1^{(k)} L_1 + \sigma_1 \mu_1^{(k)} \cos \mu_1^{(k)} L_1}(a_1 \sin \mu_1^{(k)} x + \sigma_1 \mu_1^{(k)} \cos \mu_2^{(k)} x); \; x = x_1 > L_1; \\ \varphi_2^{(k)}(x_2) = \dfrac{K^{(k)}}{a_2 \sin \mu_2^{(k)} L_2 + \sigma_2 \mu_2^{(k)} \cos \mu_2^{(k)} L_2}(a_2 \sin \mu_2^{(k)} x + \sigma_2 \mu_2^{(k)} \cos \mu_2^{(k)} x); x = L - \\ \qquad - x_2 > L_1. \end{cases} \quad (46)$$

Cu notația (42), funcțiunile proprii se scriu mai compact sub forma

$$\varphi^{(k)}(x) = \begin{cases} \varphi_1^{(k)}(x_1) = K^{(k)} \dfrac{\cos(\mu_1^{(k)} x_1 - \eta_1^{(k)})}{\cos(\mu_1^{(k)} L_1 - \eta_1^{(k)})}; & x_1 = x < L_1; \\ \varphi_2^{(k)}(x_2) = K^{(k)} \dfrac{\cos(\mu_2^{(k)} x_2 - \eta_2^{(k)})}{\cos(\mu_2^{(k)} L_2 - \eta_2^{(k)})}; & x_2 = L - x < L_2. \end{cases} \quad (47)$$

Constantele $K^{(k)} = \varphi^{(k)}(L_1)$ se vor alege pozitive și se vor determina prin condiția de normare.

Soluțiile elementare (30), caracteristice regimului liber, sînt deci de forma

$$\vartheta^{(k)}(x, t) = e^{-\frac{t}{\tau^{(k)}}} \cdot \varphi^{(k)}(x), \quad (48)$$

în care funcțiunile proprii sînt continue în $(0, L)$ și derivabile peste tot, cu excepția punctului $x = L_1$, unde derivatele lor admit discontinuități de prima specie, în acord cu (35). Condițiile de trecere (35) și ecuația (29) fiind lineare, omogene și independente de ordinul k al valorii proprii, soluția generală e o combinație liniară :

$$\vartheta(x, t) = \sum_k c_k e^{-\frac{t}{\tau^{(k)}}} \cdot \varphi^{(k)}(x), \quad (49)$$

în care suma se extinde asupra tuturor valorilor posibile ale indicelui k al

valorilor proprii $1/\tau^{(k)}$, rădăcini ale ecuației caracteristice (43). Coeficienții c_k se determină astfel, încît condiția inițială (19) să fie satisfăcută

$$\vartheta(x, 0) = F(x) - T(x) = \sum_k c_k \varphi^{(k)}(x). \tag{50}$$

Condițiile dezvoltării funcțiunii $F(x) - T(x)$ în raport cu funcțiunile proprii $\varphi^{(k)}(x)$ rezultă din analiza naturii sistemului de valori proprii și funcțiuni proprii, pe care o abordăm mai jos.

5. VALORILE PROPRII ALE PROBLEMEI FUNCȚIUNILOR PROPRII, ORTOGONALIZAREA ȘI NORMALIZAREA LOR

Funcțiunile $\varphi^{(k)}(x)$ sînt ortogonalizabile în $(0, L)$ numai introducînd în condiția de ortogonalitate o funcțiune pondere $g(x)$ de forma următoare:

$$g(x) = \begin{cases} g_1 & \text{pentru } 0 < x = x_1 < L_1; \\ g_2 & \text{pentru } L_1 < x = L - x_2 < L_2, \end{cases} \tag{51}$$

cu valori potrivit alese pentru constantele g_1 și g_2.

Dacă se notează cu $\mathfrak{L}$ operatorul linear următor, definit în $(0, L)$:

$$\mathfrak{L} = \begin{cases} \mathfrak{L}_1 = \dfrac{1}{\tau_1^0\, \beta_1^2} \dfrac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x_1^2} - \dfrac{1}{\tau_1^0}; & x = x_1; \\ \mathfrak{L}_2 = \dfrac{1}{\tau_2^0\, \beta_2^2} \dfrac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x_2^2} - \dfrac{1}{\tau_2^0}; & x = L - x_2; \end{cases} \tag{52}$$

funcțiunile lui proprii în $(0, L)$ sînt $\varphi^{(k)}(x)$:

$$\mathfrak{L}[\varphi^{(k)}(x)] = -\frac{1}{\tau^{(k)}} \varphi^{(k)}(x) \tag{53}$$

În vederea studiului valorilor proprii, soluții ale ecuației caracteristice (43), trebuie calculată (integrînd prin părți) expresia următoare (în care conjugatele complexe sînt notate cu asterisc):

$$I_{kl} = \int_0^L g(x)\, \varphi^{(k)*}(x)\, \mathfrak{L}[\varphi^{(l)}(x)]\, \mathrm{d}x. \tag{54}$$

Folosind relațiile (33), (35), (36) și (51), se obține

$$I_{kl} = \frac{g_1\, a_1}{\tau_1^0\, \beta_1^2\, \sigma_1} \varphi_1^{(k)*}(0)\, \varphi_1^{(l)}(0) + \frac{g_2\, a_2}{\tau_2^0\, \beta_2^2\, \sigma_2} \varphi_2^{(k)*}(0) \varphi_2^{(l)}(0) -$$

$$- \left[\frac{g_1}{\tau_1^0\, \beta_1^2\, \sigma_1} - \frac{g_2}{\tau_2^0\, \beta_2^2\, \sigma_2} \right] \sigma_1\, \varphi_1^{(k)*}(L_1)\, \varphi_1^{(l)}(L_1) + \frac{g_1}{\tau_1^0\, \beta_1^2} \int_0^{L_1} \frac{\mathrm{d}\varphi_1^{(k)*}}{\mathrm{d}x_1} \cdot \frac{\mathrm{d}\varphi_1^{(l)}}{\mathrm{d}x_1} \cdot \mathrm{d}x_1 + \tag{55}$$

$$+ \frac{g_2}{\tau_2^0\, \beta_2^2} \int_0^{L_2} \frac{\mathrm{d}\varphi_2^{(k)*}}{\mathrm{d}x_2} \cdot \frac{\mathrm{d}\varphi_2^{(l)}}{\mathrm{d}x_2} \cdot \mathrm{d}x_2 + \frac{g_1}{\tau_1^0} \int_0^{L_1} \varphi_1^{(k)*} \cdot \varphi_1^{(l)} \cdot \mathrm{d}x_1 + \frac{g_2}{\tau_2^0} \int_0^{L_2} \varphi_2^{(k)*} \cdot \varphi_2^{(l)}\, \mathrm{d}x_2 \cdot$$

Alegînd constantele g_1, g_2 astfel încît expresia din croşete să se anuleze

$$g(x) = \begin{cases} g_1 = \sigma_1 \tau_1^0 \beta_1^2 = \gamma_1 A_1 & \text{pentru} \quad x = x_1 < L_1; \\ g_2 = \sigma_2 \tau_2^0 \beta_2^2 = \gamma_2 A_2 & \text{pentru} \quad x = L - x_2 < L_2. \end{cases} \tag{56}$$

se obţine cu (53) următoarea egalitate:

$$I_{kl} = \frac{1}{\tau^{(k)}} \int_0^L g \varphi^{(k)*} \cdot \varphi^{(l)} \, dx = \sum_{i=1}^{2} \left[a_i \, \varphi_i^{(k)*}(0) \cdot \varphi_i^{(l)}(0) + \sigma_i \int_0^{L_i} \frac{d\varphi_i^{(k)*}}{dx_i} \cdot \frac{d\varphi_i^{(l)}}{dx_i} \cdot dx_i + \right.$$

$$\left. + \frac{g_i}{\tau_i^0} \int_0^{L_i} \varphi_i^{(k)*} \cdot \varphi_i^{(l)} \, dx_i \right]. \tag{57}$$

În cazul $k = l$ se obţine egalitatea

$$\frac{1}{\tau^{(k)}} \int_0^L g \, |\varphi^{(k)}|^2 \, dx = \sum_{i=1}^{2} \left[a_i \, |\varphi_i^{(k)}(0)|^2 + \sigma_i \int_0^{L_i} \left| \frac{d\varphi_i^{(k)}}{dx_i} \right|^2 dx_i + \frac{g_i}{\tau_i^0} \int_0^{L_i} |\varphi_i^{(k)}|^2 \, dx_i \right] \tag{58}$$

Cum mărimile g_i, a_i, β_i şi σ_i sînt pozitive, rezultă că valorile proprii $1/\tau^{(k)}$, respectiv constantele de timp $\tau^{(k)}$, sînt reale, pozitive şi finite (deoarece integralele de mai sus sînt pozitiv definite şi nenule). Soluţiile ecuaţiei caracteristice (43) formează deci un şir de mărimi pozitive: $\tau^{(1)}$, $\tau^{(2)}, \ldots, \tau^{(k)}, \ldots$

Cu (45) şi (46), mai rezultă din (58) că

$$\mu_1^{(k)2} \sigma_1 \int_0^{L_1} |\varphi_1^{(k)}|^2 \, dx_1 + \mu_2^{(k)2} \sigma_2 \int_0^{L_2} |\varphi_2^{(k)}|^2 \, dx_2 = \sum_{i=1}^{2} \left[a_i \, |\varphi_i^{(k)}(0)|^2 + \right.$$

$$\left. + \sigma_i \int_0^{L_i} \left| \frac{d\varphi_i^{(k)}}{dx_i} \right|^2 dx_i \right] > 0. \tag{59}$$

Aceasta arată că cel mult una dintre mărimile $\mu_1^{(k)2}$ şi $\mu_2^{(k)2}$ poate fi negativă, respectiv cel mult una dintre mărimile $\mu_1^{(k)}$ şi $\mu_2^{(k)}$ poate fi imaginară (cealaltă fiind reală). Din (45) rezultă atunci că cel mult unul dintre rapoartele $\tau_1^0/\tau^{(k)}$ şi $\tau_2^0/\tau^{(k)}$ este subunitar, că adică există o margine superioară pentru constantele de timp $\tau^{(k)}$, care pot fi numerotate în ordine descrescătoare

$$\tau^{(1)} > \tau^{(2)} > \ldots > \tau^{(k)} > \ldots > 0. \tag{60}$$

Există, deci un rang k, dincolo de care $\tau^{(k)} < \tau_i^0$, adică dincolo de care ambele mărimi $\mu_i^{(k)}$ sînt reale. Din (47) mai rezultă că şi în cazul în care una dintre mărimile $\mu_i^{(k)}$ ar fi imaginară, funcţiunea proprie corespunzătoare ar fi reală. Funcţiunile proprii $\varphi^{(k)}(x)$ sînt deci totdeauna reale.

În cazul $k \neq l$, se construieşte cu (57) expresia $I_{lk} - I_{kl}^*$. Cu (53) se obţine

$$I_{lk} - I_{kl}^* = \left[\frac{1}{\tau^{(k)}} - \frac{1}{\tau^{(l)}} \right] \int_0^L g \varphi^{(k)*} \, \varphi^{(l)} \, dx = 0. \tag{61}$$

Expresiile (47) ale funcţiunilor proprii arată că ele sînt funcţiuni pare de $\mu_i^{(k)}$, că adică, oricare ar fi semnul luat înaintea radicalilor (45),

unei valori proprii date îi corespunde o singură funcțiune proprie. Dacă două funcțiuni proprii $\varphi^{(k)}$ și $\varphi^{(l)}$ sînt distincte, și valorile proprii corespunzătoare sînt distincte, adică $\tau^{(k)} \neq \tau^{(l)}$ (ceea ce justifică scrierea lor în șirul (60).

Egalitatea (61) poate fi satisfăcută numai dacă

$$\int_0^L g\,\varphi^{(k)*}\,\varphi^{(l)}\,\mathrm{d}x = 0. \tag{62}$$

Funcțiunile proprii $\varphi^{(k)}(x)$ sînt deci ortogonale în $(0, L)$, cu ponderea $g(x)$ dată de (56). Dacă am determinat toate rădăcinile ecuației (43), am determinat deci toate funcțiunile proprii ale problemei (10). Dezvoltarea (47) e deci dezvoltarea în serie corespunzătoare sistemului ortogonal și complet de funcțiuni proprii.

$$\varphi^{(1)}(x), \varphi^{(2)}(x), \ldots, \varphi^{(n)}(x), \ldots \tag{63}$$

asociat prin (42), (45) și (47) șirului de valori proprii (60).

Prin normalizarea funcțiunilor proprii $\varphi^{(k)}(x)$ se sistematizează calculul coeficienților seriei (50). Se aleg, anume, coeficienții reali și pozitivi $K^{(k)}$ din (47), — lipsiți de orice altă semnificație, prin faptul că în seria (50) intervin numai produsele $K^{(k)} c_k$, — astfel ca să fie satisfăcută condiția

$$\int_0^L g(x)\,|\,\varphi^{(k)}(x)\,|^2\,\mathrm{d}x = 1 \tag{64}$$

și cu (56) și (47) se obține

$$1/K^{(k)} =$$

$$\sqrt{\frac{\gamma_1 A_1}{2\mu_1^{(k)}}\cdot\frac{\sin 2(\mu_1^{(k)}L_1-\eta_1^{(k)})+\sin 2\eta_1^{(k)}+2L_1\mu_1^{(k)}}{1+\cos 2(\mu_1^{(k)}L_1-\eta_1^{(k)})}+\frac{\gamma_2 A_2}{2\mu_2^{(k)}}\cdot\frac{\sin 2(\mu_2^{(k)}L_2-\eta_2^{(k)})+\sin 2\eta_2^{(k)}+2L_2\mu_2^{(k)}}{1+\cos 2(\mu_2^{(k)}L_2-\eta_2^{(k)})}}. \tag{65}$$

6. REGIMUL TRANZITORIU ÎN CONDIȚII INIȚIALE DATE

Cu (65) și (47), sistemul de funcțiuni reale $\varphi^{(k)}(x)$ este un sistem complet și ortonormal în $(0, L)$, satisfăcînd deci relațiile

$$\int_0^L g(x)\,\varphi^{(k)}(x)\,\varphi^{(l)}(x)\,\mathrm{d}x = \delta_{kl} \text{ unde } \delta_{kl} = \begin{cases} 1 \text{ dacă } l = k \\ 0 \text{ dacă } l \neq k. \end{cases} \tag{66}$$

Dezvoltarea (50) a funcțiunii $F(x) - T(x)$ e deci seria corespunzătoare sistemului $\varphi^{(k)}(x)$, coeficienții seriei c_k fiind dați de expresiile obținute formal prin integrarea termen cu termen a seriei (50), înmulțită cu $g(x)\,\varphi^{(k)}(x)$, în $(0, L)$

$$c_k = \int_0^L g(x)\,\varphi^{(k)}(x)\,[F(x) - T(x)]\,\mathrm{d}x =$$

$$= \int_0^L g\cdot\varphi^{(k)}\cdot F\cdot\mathrm{d}x - \int_0^L g\cdot\varphi^{(k)}\cdot T\cdot\mathrm{d}x = c_{kF} - c_{kT}. \tag{67}$$

În această relație c_{kF} este coeficientul dezvoltării, corespunzător repartiției inițiale $F(x) = \Theta\ (x,\ 0)$ a temperaturii în bară :

$$c_{kF} = \int_0^L g\,(x)\ \varphi^{(k)}\ (x)\,\Theta\,(x, 0)\,\mathrm{d}x, \tag{68}$$

iar c_{kT} este coeficientul Fourier corespunzător repartiției finale $T\,(x) = \Theta\ (x,\ \infty)$ a temperaturii în bară

$$c_{kT} = \int_0^L g\,(x)\ \varphi^{(k)}\ (x)\,\Theta\,(x, \infty)\,\mathrm{d}x. \tag{69}$$

Calculul acestui din urmă coeficient se poate efectua direct cu (22), (25), (26) etc. O cale indirectă, mai simplă, consistă în folosirea explicită a ecuațiilor (21) și (38), satisfăcute de funcțiunile $T_i(x_i)$ și $\varphi_i^{(k)}(x_i)$. Efectuînd integrala (69) pe fiecare subinterval (i) în parte, cu o integrare prin părți, și folosind condițiile de trecere și la limită (23), (24), (35), (36), se obține cu (66)

$$\begin{aligned} c_{kT} = \tau^{(k)}\ K^{(k)} \Bigg[& P_{12} + \frac{\cos \eta_1^{(k)}}{\cos\,(\mu_1^{(k)} L_1 - \eta_1^{(k)})}\, P_1 + \frac{\cos \eta_2^{(k)}}{\cos\,(\mu_2^{(k)} L_2 - \eta_2^{(k)})}\, P_2 + \\ & + \frac{\sigma_1\ \beta_1^2\ \Theta_1^0}{\mu_1^{(k)}} \cdot \frac{\sin\,(\mu_1^{(k)} L_1 - \eta_1^{(k)}) + \sin \eta_1^{(k)}}{\cos\,(\mu_1^{(k)} L_1 - \eta_1^{(k)})} + \\ & + \frac{\sigma_2\ \beta_2^2\ \Theta_2^0}{\mu_2^{(k)}} \cdot \frac{\sin\,(\mu_2^{(k)} L_2 - \eta_2^{(k)}) + \sin\ \eta_2^{(k)}}{\cos\,(\mu_2^{(k)} L_2 - \eta_2^{(k)})} \Bigg]. \end{aligned} \tag{70}$$

Repartiția și evoluția supratemperaturii $\Theta\ (x,\ t)$ în bară, în regim tranzitoriu, sînt exprimate deci de următoarea relație :

$$\Theta\,(x, t) = T\,(x) + \sum_{k=1}^{\infty} (c_{kF} - c_{kT}) \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau^{(k)}}}\ \varphi^{(k)}\ (x) \tag{71}$$

sau

$$\Theta\,(x,\ t) = \sum_{k=1}^{\infty} (c_{kT} - c_{kT}\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau^{(k)}}} + c_{kF}\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau^{(k)}}})\ \varphi^{(k)}\,(x), \tag{72}$$

în care : $\tau^{(k)}$ sînt rădăcinile ecuației caracteristice (43), cu $\mu_1^{(k)}$, $\mu_2^{(k)}$, $\eta_1^{(k)}$, $\eta_2^{(k)}$ dați de (45) și (42) ; c_{kF} sînt coeficienții (68) ai dezvoltării repartiției inițiale a temperaturii ; c_{kT} sînt coeficienții (70) ai dezvoltării repartiției permanente $T\,(x)$ a temperaturii, cu $K^{(k)}$ dat de (65) ; $\varphi^{(k)}\,(x)$ sînt funcțiunile proprii, care au în intervalele $0 \leqslant x = x_1 < L_1$ și $L_1 < x = L - x_2 < L$ expresiile (47). Restul notațiilor sînt cele din par. 2. —

Concluzii : Metoda funcțiunilor proprii poate fi utilizată și în cazul rezolvării unei probleme la limită cu ecuație de tip hiperbolic într-un domeniu omogen pe porțiuni, cu introducerea unor funcțiuni proprii definite în întregul domeniu și prezentînd discontinuități ale derivatelor pe suprafețele de separație a porțiunilor omogene. Ortogonalizarea acestor

funcțiuni proprii se obține cu ajutorul unei funcțiuni pondere tip „treaptă" (prezentînd discontinuități de prima specie pe aceleași suprafețe). Exemplul studiat permite determinarea evoluției și repartiției temperaturii într-o bară neomogenă, în condiții la limită și de încălzire suficient de generale. Prin particularizare se pot obține soluțiile unor probleme mai simple : încălzire numai volumică ($P_1 = 0$, $P_2 = 0$), încălzire numai frontală ($\Theta_i^0 = 0$, $P_{12} = 0$), încălzire prin rezistență de contact ($\Theta_i^0 = 0$, $P_i = 0$) etc.

7. REGIMUL TERMIC TRANZITORIU AL UNUI INEL OMOGEN PE PORȚIUNI

Aplicăm metoda la cazul unui inel neomogen, studiat pînă în prezent printr-o metodă de aproximație, cum și experimental, de către J. Kirchdorfer [2], drept model simplificat al regimului termic din termobimetalele utilizate în reglaje și automatizări.

Inelul circular conductor (v. fig. 2) e presupus parcurs de un curent electric de valoare efectivă I, cu secțiunea transversală avînd dimensiunile lineare destul de mici față de lungimea sa $2L$, pentru a se putea neglija neuniformitatea temperaturii în punctele secțiunilor sale. Inelul e presupus constituit din două secțiuni omogene, cu proprietăți de material și dimensiuni diferite, de lungimi $2L_1$ și $2L_2$. În aceste condiții, temperatura e funcțiune numai de timpul t [s] și de lungimea de arc x[cm], măsurată în lungul conductorului, de la mijlocul 0 al segmentului (1).

Dacă A_i[cm^2], p_i [cm], γ_i [J. cm^{-3} grd^{-1}], λ_i [W · cm^{-1} · grd^{-1}], α_i[W · cm^{-2} · grd^{-1}] și ρ_i [Ω · cm] sînt respectiv aria secțiunii transversale,

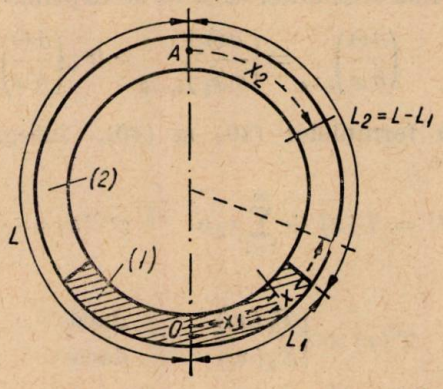


Fig. 2. — Inel conductor omogen pe două porțiuni.

perimetrul secțiunii transversale, căldura specifică volumică, conductivitatea termică, coeficientul de transfer al căldurii prin suprafața laterală și rezistivitatea materialului segmentului $i = 1$, respectiv $i = 2$, dacă se folosesc notațiile (5) pentru β_i, (6) pentru τ_i^0, (8) pentru σ_i, (7) pentru Θ_i^0, (20) pentru x_1 și x_2, — și pentru orice funcțiune $f(x)$ definită în $(0, L)$

$$f(x) = \begin{cases} f_1(x_1) = f_1(x) \text{ dacă } 0 \leqslant x < L_1, (i = 1) \\ f_2(x_2) = f_2(L - x) \text{ dacă } L_1 < x \leqslant L = L_1 + L_2, \ (i = 2), \end{cases} \tag{73}$$

se pune problema determinării supratemperaturii $\Theta(x, t)$ în fiecare punct al inelului și în fiecare moment, presupunînd că mediul ambiant e un termostat și că încălzirea are loc exclusiv prin efectul electrocaloric din inel, începînd cu momentul $t = 0$, înainte de care inelul era „rece" adică, după (2)

$$\Theta(x, 0) = 0. \tag{74}$$

Din motive de simetrie interesează numai intervalul $(0, L)$ al coordonatei x, corespunzător unei jumătăți de inel. În fiecare segment (i), ecuația căldurii are forma (9) care se va folosi sub forma

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{1}{\tau^0 \beta^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} - \frac{\Theta - \Theta^0}{\tau^0}; \qquad (x \neq L_1). \tag{75}$$

În punctul de discontinuitate $x = L_1$, neglijînd dezvoltarea de putere în rezistența de contact, condițiile de trecere sînt date de egalitatea temperaturilor și de conservarea fluxului de căldură (3)

$$[\Theta(x, t)]_{x=L_1-0} = [\Theta(x, t)]_{x=L_1+0}; \; \sigma_1 \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x=L_1-0} = \sigma_2 \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x=L_1+0}, \tag{76}$$

sau, cu notația (73):

$$\Theta_1(L_1, t) = \Theta_2(L_2, t); \qquad \sigma_1 \left(\frac{\partial \Theta_1}{\partial x_1}\right)_{x_1=L_1} = \sigma_2 \left(\frac{\partial \Theta_2}{\partial x_2}\right)_{x_2=L_2}. \tag{77}$$

Din motive de simetrie, fluxurile de căldură prin capetele A, O ale jumătății de inel sînt nule, ceea ce se exprimă prin condițiile la limită

$$\left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x=0} = \left(\frac{\partial \Theta_1}{\partial x_1}\right)_{x_1=0} = 0; \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)_{x=L} = \left(\frac{\partial \Theta_2}{\partial x_2}\right)_{x_2=0} = 0. \tag{78}$$

Conform formulelor (19) și (49), integrala corespunzătoare a ecuației (75) este

$$\Theta(x, t) = T(x) + \sum_{k=1}^{\infty} c_k e^{-\frac{t}{\tau^{(k)}}} \varphi^{(k)}(x) = -\sum_{k=1}^{\infty} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau^{(k)}}}\right] c_k \varphi^{(k)}(x), \tag{79}$$

în care

$$T(x) = \begin{cases} T_1(x_1) & \text{dacă} \quad 0 \leqslant x = x_1 < L_1 \\ T_2(x_2) & \text{dacă} \quad L_1 < x = L - x_2 \leqslant L_1 \end{cases} \tag{80}$$

este soluția pentru regim staționar a ecuației (75), cu condițiile (77) și (78), iar

$$\varphi^{(k)}(x) = \begin{cases} \varphi_1^{(k)}(x_1) & \text{dacă} \quad 0 \leqslant x = x_1 < L_1, \\ \varphi_2^{(k)}(x_2) & \text{dacă} \quad L_1 < x = L - x_2 \leqslant L, \end{cases} \tag{81}$$

sînt funcțiunile proprii ale problemei, obținute substituind în ecuația (75) omogenizată (cu $\Theta^0 = 0$) soluții de regim liber cu variabile separate, de forma $e^{-t/\tau^{(k)}} \cdot \varphi^{(k)}(x)$. Constantele c_k se determină cu condiția inițială (74)

dezvoltînd în serie de $\varphi^{(k)}(x)$ funcțiunea $T(x)$, iar $\tau^{(k)}$ sînt valorile proprii ale problemei (constante de timp caracteristice), determinate de ecuația valorilor proprii care rezultă impunînd funcțiunilor proprii verificarea tuturor condițiilor de trecere și la limită, omogene, date de (77) și (78).

8. SOLUȚIA PENTRU REGIMUL STAȚIONAR

Temperatura de regim staționar $T(x)$, care verifică în fiecare subinterval (i) ecuația

$$\frac{1}{\beta_i^2}\frac{\mathrm{d}^2 T_i}{\mathrm{d}x_i^2} - (T_i - \Theta_i^0) = 0, \tag{82}$$

are expresia generală

$$T_i(x_i) = \Theta_i^0 + A_i \operatorname{sh} \beta_i x_i + B_i \operatorname{ch} \beta_i x_i. \tag{83}$$

Cu (78) rezultă $A_i = 0$, iar cu (77) se determină B_i. Se obțin expresiile

$$T(x) = \begin{cases} T_1(x_1) = \Theta_i^0 - A_{12}\dfrac{\operatorname{ch}\beta_1 x_1}{\sigma_1\beta_1 \operatorname{sh}\beta_1 L_1} = \Theta_1^0 - A_{12}\dfrac{\operatorname{ch}\beta_1 x}{\sigma_1\beta_1 \operatorname{sh}\beta_1 L_1}; \\ T_2(x_2) = \Theta_2^0 - A_{21}\dfrac{\operatorname{ch}\beta_2 x_2}{\sigma_2\beta_2 \operatorname{sh}\beta_2 L_2} = \Theta_2^0 - A_{21}\dfrac{\operatorname{ch}\beta_1 (L-x)}{\sigma_2\beta_2 \operatorname{sh}\beta_2 L_2}, \end{cases} \tag{84}$$

în care

$$A_{12} = \frac{\Theta_1^0 - \Theta_2^0}{\dfrac{1}{\sigma_1\beta_1}\operatorname{cth}\beta_1 L_1 + \dfrac{1}{\sigma_2\beta_2}\operatorname{cth}\beta_2 L_2} = -A_{21} \tag{85}$$

9. FUNCȚIUNILE PROPRII ALE OPERATORULUI LINEAR DIN MEMBRUL DREPT AL ECUAȚIEI (75)

Căutînd soluții de regim liber cu variabile separate, de forma $\mathrm{e}^{-t/\tau^{(k)}} \cdot \varphi^{(k)}(x)$, se obțin pentru funcțiunile $\varphi_i^{(k)}(x_i)$ din (81) ecuațiile $(i = 1, 2)$

$$\mathfrak{L}_i[\varphi_i^{(k)}] = \frac{1}{\tau_i^0\beta_i^2}\frac{\mathrm{d}^2\varphi_i^{(k)}}{\mathrm{d}x_i^2} - \frac{1}{\tau_i^0}\varphi_i^{(k)} = \frac{1}{\tau^{(k)}}\varphi_i^{(k)}, \tag{86}$$

sau

$$\varphi_i^{(k)} + \frac{1}{\mu_i^{(k)2}}\frac{\mathrm{d}^2\varphi_i^{(k)}}{\mathrm{d}x_i^2} = 0, \tag{87}$$

cu

$$\mu_1^{(k)} = \beta_1\sqrt{\frac{\tau_1^0}{\tau^{(k)}} - 1}\ ;\ \mu_2^{(k)} = \beta_2\sqrt{\frac{\tau_2^0}{\tau^{(k)}} - 1}\ , \tag{88}$$

ale căror soluții generale am arătat în (39) că sînt

$$\varphi_i^{(k)} = C_i^{(k)} \sin \mu_i^{(k)} x_i + D_i^{(k)} \cos \mu_i^{(k)} x_i. \tag{89}$$

Aceste funcțiuni satisfac condițiile la limită care rezultă din (77) și (78)

$$\varphi_1^{(k)}(L_1) = \varphi_2^{(k)}(L_2);\ \sigma_1 \varphi_1'^{(k)}(L_1) - \sigma_2 \varphi_2'^{(k)}(L_2) = 0;\ \varphi_1^{(k)}(0) = \varphi_2^{(k)}(0) = 0, \tag{90}$$

unde accentul reprezintă derivarea. Ținînd seamă de aceste condiții, coeficienții $C_i^{(k)}$ și $D_i^{(k)}$ sînt determinați pînă la un factor constant $K^{(k)} = \varphi_i^{(k)}(L_i)$ și rezultă

$$\varphi_i^{(k)} = K^{(k)} \frac{\cos \mu_i^{(k)} x_i}{\cos \mu_i^{(k)} L_i}; \qquad (i = 1,\ 2). \tag{91}$$

Condițiile (90) reprezentînd patru ecuații lineare și omogene cu patru necunoscute, au soluții identic nule numai dacă se anulează determinantul sistemului, ceea ce conduce la ecuația de valori proprii (ecuație în $\tau^{(k)}$)

$$V_{12}^{(k)} \equiv \sigma_1 \mu_1^{(k)} \operatorname{tg} \mu_1^{(k)} L_1 = -\sigma_2 \mu_2^{(k)} \operatorname{tg} \mu_2^{(k)} L_2 \equiv -V_{21}^{(k)}. \tag{92}$$

Am arătat că rădăcinile acestei ecuații transcendente, în care $\mu_1^{(k)}$ și $\mu_2^{(k)}$ au expresiile (88), sînt reale și pozitive și constituie un șir infinit descrescător :

$$\tau^{(1)} > \tau^{(2)} > \cdots > \tau^{(k)} > \cdots > 0, \tag{93}$$

mărginit superior de cea mai mare dintre mărimile τ_1^0 sau τ_2^0. Funcțiunile proprii corespunzătoare (81), date de (91), sînt reale și distincte pentru indici k distincți. Conform demonstrației generale date, aceste funcțiuni proprii $\varphi_i^{(k)}(x_i)$ sînt ortogonale în $(0,\ L)$, cu ponderea (56).

În adevăr, cu (88), (91) și (56), se obține în cazul inelului considerat

$$\sum_{i=1}^{2} g_i \int_0^{L_i} \varphi_i^{(k)} \varphi_i^{(l)}\, \mathrm{d}x_i = \frac{K^{(k)}}{\dfrac{1}{\tau^{(k)}} - \dfrac{1}{\tau^{(l)}}} [\sigma_1 \mu_1^{(k)} \operatorname{tg} \mu_1^{(k)} L_1 + \tag{94}$$

$$+ \sigma_2 \mu_2^{(k)} \operatorname{tg} \mu_2^{(k)} L_2 - \sigma_1 \mu_1^{(l)} \operatorname{tg} \mu_1^{(l)} L_1 - \sigma_2 \mu_2^{(l)} \operatorname{tg} \mu_2^{(l)} L_2].$$

Dacă se ține seama de ecuația valorilor proprii (92), rezultă condiția de ortogonalitate

$$\int_0^L g(x) \varphi^{(k)}(x)\, \varphi^{(l)}(x)\, \mathrm{d}x = 0 \qquad \text{dacă } l \neq k. \tag{95}$$

Pentru calculele ulterioare e convenabil să se aleagă constantele $K^{(k)}$ pozitive și astfel, încît funcțiunile proprii (81), cu (91), să fie normate în $(0,\ L)$ adică :

$$\int_0^L g(x) [\varphi^{(k)}(x)]^2\, \mathrm{d}x = \sum_{i=1}^{2} g_i \int_0^{L_i} [\varphi_i^{(k)}(x_i)]^2\, \mathrm{d}x_i = 1. \tag{96}$$

Înlocuind (91) cu (94) și (92), se obține, analog cu (65)

$$1/K^{(k)} =$$

$$\sqrt{\frac{V_{12}^{(k)}\tau^{(k)}}{2}\left[\frac{\tau_1^0}{\tau_1^0-\tau^{(k)}}+\frac{\tau_2^0}{\tau_2^0-\tau^{(k)}}+\frac{\gamma_1 A_1 L_1+\gamma_2 A_2 L_2}{V_{12}^{(k)}\,\tau^{(k)}}+V_{12}^{(k)}\left(\frac{L_1\tau_1^0}{\sigma_1(\tau_1^0-\tau^{(k)})}+\frac{L_2\tau_2^0}{\sigma_2(\tau_2^0-\tau^{(k)})}\right)\right]}. \tag{97}$$

10. SOLUȚIA PROBLEMEI ÎN CONDIȚII INIȚIALE DATE

Coeficienții c_k ai soluției (79) a problemei considerate se determină punînd condiția inițială (74)

$$\Theta(x,0) = 0 = T(x) + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \varphi^{(k)}(x), \tag{98}$$

de unde rezultă că $-c_k$ sînt coeficienții dezvoltării lui $T(x)$ în raport cu șirul ortonormat și complet $\varphi^{(k)}(x)$

$$-c_k = \int_0^L g(x)\,T(x)\,\varphi^{(k)}(x)\,\mathrm{d}x = \sum_{i=1}^{2} g_i \int_0^{L_i} T_i(x_i)\,\varphi_i^{(k)}(x_i)\,\mathrm{d}x_i. \tag{99}$$

Efectuînd calculele cu (91) și (92), se obține

$$-c_k = \tau^{(k)2} K^{(k)} V_{12}^{(k)}\left[\frac{\Theta_1^0}{\tau_1^0-\tau^{(k)}}-\frac{\Theta_2^0}{\tau_2^0-\tau^{(k)}}\right]. \tag{100}$$

Expresiile (97) și (100) rezultă și imediat din expresiile generale (65) și (70) dacă se particularizează punînd

$$P_1 = P_2 = P_{12} = 0\,; \quad a_1 = a_2 = 0\,; \quad \eta_1^{(k)} = \eta_2^{(k)} = 0. \tag{101}$$

Cu (79), (91), (97) și (100), soluția problemei devine în segmentul $i = 1,2$:

$$\Theta_i(x_i,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \Lambda_k\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau^{(k)}}}\right)\frac{\cos\mu_i^{(k)}(x_i)}{\cos\mu_i^{(k)}(L_i)}, \tag{102}$$

în care x_i sînt dați de (73), $\tau^{(k)}$ sînt rădăcinile ecuației (92) cu $\mu_i^{(k)}$ din (88), iar

$$\Lambda_k = -c_k K^{(k)} =$$

$$= \tau^{(k)}\frac{\dfrac{\Theta_1^0}{\tau_1^0-\tau^{(k)}}-\dfrac{\Theta_2^0}{\tau_2^0-\tau^{(k)}}}{\dfrac{\tau_1^0}{\tau_1^0-\tau^{(k)}}-\dfrac{\tau_2^0}{\tau_2^0-\tau^{(k)}}+\dfrac{\gamma_1 A_1 L_1+\gamma_2 A_2 L_2}{V_{12}^{(k)}\,\tau^{(k)}}+V_{12}^{(k)}\left|\dfrac{L_1\tau_1^0}{\sigma_1(\tau_1^0-\tau^{(k)})}+\dfrac{L_2\tau_2^0}{\sigma_2(\tau_2^0-\tau^{(k)})}\right|}. \tag{103}$$

Soluția (102) poate fi obținută și cu ajutorul transformatei Laplace, cum se arată într-o altă lucrare încheiată a autorilor, de publicat ulterior.

11. Verificare experimentală

În lucrarea [2], J. Kirchdorfer a calculat cu metode de aproximație și a studiat experimental regimul tranzitoriu de încălzire electrică a unui inel omogen pe porțiuni, avînd caracteristicile trecute în tabela 1.

Tabela 1

i	Materialul	γ_i J/cm³ · °C	α_i W/cm² · °C	λ_i W/cm · °C	p_i cm	A_i cm²	L_i cm	τ_i s	β_i cm^{-1}	σ_i Wcm/°C	Θ_i^0 °C	I A
1	constantan	3,72	$18{,}5 \cdot 10^{-4}$	0,245	2,2	0,1	6	9 440	0,40759	0,0245	184,7	40
2	cupru	3,45	$11{,}6 \cdot 10^{-4}$	3,93	2,16	0,08	50	110,15	0,089272	0,3144	14,93	40

Ecuația caracteristică (92) devine

$$0{,}0245\,\mu_1^{(k)} \operatorname{tg} 6\,\mu_1^{(k)} = -\,0{,}3144\,\mu_2^{(k)} \operatorname{tg} 50\,\mu_2^{(k)} = V_{12}^{(k)}, \tag{104}$$

cu :

$$\mu_1^{(k)} = 0{,}40759\sqrt{\frac{91{,}40}{\tau^{(k)}} - 1}\,; \quad \mu_2^{(k)} = 0{,}089272\sqrt{\frac{110{,}15}{\tau^{(k)}} - 1}.$$

Rezolvînd această ecuație prin metode de interpolare, pentru $k = 1, 2, 3, 4$, se obțin valorile din tabela 2.

Tabela 2

k	1	2	3	4
$\tau^{(k)}$	107,7	78,81	59,94	36,7
$V_{12}^{(k)}$	−0,2884	0,589	−3,544	−0,0016
$\Lambda^{(k)}$	31,44	43,05	−14,6	−0,854

Calculînd temperatura de regim permanent cu (84), se obține în punctul de joncțiune $T(L_1) = 59°C$ și

$$\Theta(L_1, t) = 59 - 31{,}44 \cdot e^{-\frac{t}{107{,}7}} - 43{,}05 \cdot e^{-\frac{t}{78{,}81}} + 14{,}6\, e^{-\frac{t}{59{,}84}} + \\ + 0{,}854 \cdot e^{-\frac{t}{36{,}7}} + \cdots \tag{105}$$

Pentru valori nu prea mici ale lui t, această serie este rapid convergentă. Pentru valori mici ale lui t, se poate determina cu metode operaționale panta temperaturii în origine și apoi, cu aproximație liniară

$$\Theta(x,0) = \lim_{p\to 0} p^2\,\Theta(x,p)$$

și

$$\Theta(x,t) \approx \Theta(x,0) + t\,\Theta'(x,0).$$

Calculînd cu (102) valorile supratemperaturii, se obține o abatere de 3... 6% față de valorile experimentale indicate în [2]. De asemenea, se constată că și aproximația dată în [2] conduce la rezultate apropiate de cele experimentale, ele prezentînd în cazul considerat abateri doar de ordinul procentelor față de rezultatele autorilor.

AUSGLEICHSVORGÄNGE BEI DER ELEKTRISCHEN ERWÄRMUNG VON ABSCHNITTSWEISE HOMOGENEN LEITENDEN SCHIENEN

ZUSAMMENFASSUNG

Die Verfasser untersuchen die Ausgleichsvorgänge bei der Erwärmung (und Abkühlung) von dünnen, abschnittsweise homogenen Schienen, unter Anlehnung an das Beispiel einer Schiene mit zwei homogenen Abschnitten und unter Vernachlässigung der Ungleichförmigkeit der Temperatur in den Schienen und in den Querschnitten; dann wird in der Lösung der betreffenden Form der Differentialgleichung der Wärmeleitung (9) der dem stationären Endzustand entsprechende Teil von dem des freien Ausgleichvorgangs entsprechenden Teil (15) additiv getrennt. Es wird die allgemeine,dem stationären Endzustand ensprechende allgemeine Lösung (22) bestimmt und dann, durch Trennung der Variabeln, die dem freien Ausgleichsvorgang entsprechende Lösung (49) als Funktion der Eigenwerte und Eigenfunktionen des Problems ermittelt. Anschließend werden die Eigenwerte und Eigenfunktionen untersucht und deren Orthogonalisierung auf der ganzen Schiene mit Hilfe von Gewichtsfunktionen, die von einem homogenen Teil zum anderen variieren, sowie deren Normalisierung vorgenommen. Darauf fußend wird dann bei gegebenen Anfangsbedingungen der Ausgleichsvorgang beschrieben.

Es wird dann eine Anwendung der erhaltenen allgemeinen Ergebnisse gemacht auf die Erwärmung eines aus zwei homogenen Abschnitten bestehenden Ringes — gemäß Gleichung (75), — den Kirchdorfer mit Hilfe von Näherungen untersucht hat. In (83) wird die Lösung für den stationären Endzustand dieses Ringes angegeben, die Eigenfunktionen des linearen Operators im rechten Glied der Gleichung (75) bestimmt, in (102) die Lösung des Problems für den im Anfangszustand „kalten" Ring dargelegt, das Ergebnis mit den Versuchsdaten von Kirchdorfer

verglichen, wobei sich 3—6%ige Abweichungen hiervon ergeben. Gleichzeitig wird festgestellt, daß in diesem besonderen Fall die Näherung von Kirchdorfer Ergebnisse ergibt, die denjenigen sehr nahe liegen, welche von den Verfassern bei Lösung des Problems ohne auf die Näherungen des genannten Verfassers zurückzugreifen, erhalten wurden und dabei zu Ergebnissen gelangt sind, die in allgemeineren Fällen als der betrachtete Ring anwendbar sind.

BIBLIOGRAFIE

1. R. RĂDULEȚ, *Leitungsbedarf beim elektrischen Widerstandschweissen.* Bull. scient. de l'Ecole Polytechnique de Timișoara, **XI**, *1—2*, 3—15 (1943).
2. I. KIRCHDORFER, *Die Berechnung der Erwärmung von elektrischen Leitern mit stückweise verschiedenem Querschnitt.* Archiv für Elektrotechnik, **46**, *4*, 223—244 (1961).
3. — Archiv für Elektrotechnik, **40**, *1* (1955).
4. — Archiv für Elektrotechnik, **40**, *2* (1955).
5. A. AVRAMESCU, *Calculul încălzirii staționare a contactelor electrice.* Electrotehnica, **1**, *9*, 25—35 (1953).
6. — *Calculul încălzirii bandei în contact frontal prin curent electric.* Com. Acad. R.P.R., **9**, *2*, 105—113 (1959).
7. — *Contribuții la calculul încălzirii contactelor electrice plane finite.* St. cerc. energ., **X**, *1*, 125 (1960).
8. G. BÄCH, *Über die Erwärmung des n-Körpersystems.* Archiv für Elektrotechnik, **27**, *11*, 749—760 (1933).
9. I. KESSLER, *Versuch einer genaueren Vorausberechnung der zeitlichen Erwärmung elektrischer Maschinen mittels Wärmequellen.* Archiv für Elektrotechnik, **45**, *1*, 49—58 (1960).
10. G. P. TOLSTOV, *Serii Fourier.* Ed. tehnică, București, 1955.
11. А. Б., ЛЫКОВ *Теория теплопроводности*, Гос. изд. тех. теор. лит., Москва, 1952.

CARACTERISTICILE ȘI DIMENSIUNILE PRINCIPALE ALE SERIILOR DE TRANSFORMATOARE DE PUTERE DE 100—1600 kVA DETERMINATE DE CONDIȚII TEHNICO-ECONOMICE*)

DE

M. E. BÎRGĂUANU și D. V. CREȚU

621.314.212.002.2 : 621.312.003.1

1. INTRODUCERE

Ponderea mereu crescîndă pe care consumul de energie electrică o ocupă în economia națională și faptul că puterea instalată în transformatoarele de distribuție și de alimentare a unităților industriale cu consum redus de energie electrică reprezintă de 2—3 ori puterea instalată în centralele electrice face actuală reconsiderarea criteriilor care stau la baza proiectării seriilor de transformatoare din gama de puteri mici și mijlocii. Pe lîngă condițiile tehnice pe care trebuie să le satisfacă transformatoarele, se adaugă criterii suplimentare atît în urma introducerii de materiale noi folosite în fabricație cît și în urma considerării de noi aspecte economice rezultate din politica generală a eficienței investițiilor și a repartizării cheltuielilor de exploatare.

Scopul lucrării constă în determinarea caracteristicilor și dimensiunilor principale a două serii de transformatoare trifazate de puteri

*) Lucrare comunicată la sesiunea Uzinelor Electroputere — Craiova la data de 18 mai 1963.

cuprinse între 100 și 1 600 kVA cu izolație corespunzătoare tensiunilor nominale la borne de 20 kV și 35 kV care, în condițiile specifice țării noastre, să reprezinte soluția tehnico-economică optimă.

2. DATE GENERALE PRIVIND SERIILE

Treptele de puteri sînt : $S_n = 100, 160, 250, 400, 630, 1\,000$ și $1\,600$ kVA pentru seria corespunzătoare izolației înfășurării de tensiune mai înaltă $U_n = 20$ kV, iar pentru nivelul de izolație de 35 kV aceleași trepte, mai puțin primele două, constituind o serie geometrică cu rația 1,6. Rezultatele obținute în lucrare se pot extinde și la alte puteri cuprinse între limitele mai sus indicate, deoarece soluțiile sînt date sub formă de curbe. Materialul activ folosit pentru miez este tola silicioasă laminată, la rece, prevăzută să fie recoaptă după prelucrare.

Înfășurările se execută din aluminiu pentru transformatoare pînă la 630 kVA iar pentru înfășurările transformatoarelor de puteri mai mari se folosește cupru pe partea de tensiune mai joasă, pentru reducerea pierderilor suplimentare, și aluminiu pe partea de tensiune mai înaltă.

Tensiunile de scurtcircuit urmărite a fi realizate prin proporționarea transformatoarelor sînt cele prevăzute în standardele de stat.

Spre deosebire de procedeele de calcul tehnic, în calculul tehnico-economic folosit nu s-a impus inițial un nivel al pierderilor de mers în gol și de scurtcircuit ci ele au rezultat în urma determinării transformatorului cu cost anual minim în condițiile respectării parametrilor impuși. Valoarea inducției magnetice influențează dimensiunile principale ale transformatorului [1], însă cu mult mai puțin costul total anual minim și pierderile de scurtcircuit nominale pentru care se obține acest cost. Valoarea inducției pentru care se obține optimum depinde într-o oarecare măsură de puterea transformatorului dar mai mult de valoarea tensiunii nominale care caracterizează nivelul de izolație. Din studiile prealabile efectuate pentru seriile ce se analizează în prezenta lucrare, a rezultat că inducțiile în coloană B_a pentru care se obține optimum variază între $1{,}58 \cdots 1{,}63$ T pentru puteri de 100 kVA respectiv 1 600 kVA. Deoarece însă variația în aceste limite restrînse a inducției are o influență neglijabilă asupra costului total anual minim [5] în calculele ulterioare s-a adoptat pentru ambele serii inducția $B_a = 1{,}6$ T.

Raportul secțiunilor jugului și coloanei ν variază în construcțiile actuale între 1,05—1,12. Studii recente între care și [2] arată că costul total anual minim se obține pentru valori mai ridicate ($\nu = 1{,}35$) ale acestui raport. Dat fiind că toate metodele tehnico-economice de calcul al transformatoarelor (vezi și [3]) iau în considerație numai partea activă a transformatorului și deoarece abaterile costului anual minim, la variații în jurul valorii optime a raportului secțiunilor, este neînsemnat, în studiul de față s-a adoptat $\nu = 1{,}1$, fiind cunoscut că abaterea în minus de la raportul optim conduce la reducerea volumului de ulei și a înălțimii și greutății cuvei.

Pentru calculul concret al seriilor s-a adoptat metoda tehnico-economică descrisă în [4] şi [5].

Valoarea indicilor tehnici şi economici folosiţi în lucrare este dată în anexă.

În figura 1 sînt reprezentate, cu notaţiile respective dimensiunile principale şi distanţele de izolaţie.

În cazul transformatoarelor cu înfăşurări mixte de Cu-Al, s-au dedus valori medii ponderate pentru densitate $\gamma_{Cu\,Al}$, cost specific $m_{Cu\,Al}$, şi rezistivitate $\rho_{Cu\,Al}$.

Pierderile specifice în fier au fost considerate proporţionale cu pătratul inducţiei. Puterea specifică de magnetizare adoptată a fost determinată din datele experimentale.

Factorii de majorare a pierderilor în miez şi înfăşurări K_D şi K_λ au fost aleşi pe baza rezultatelor încercărilor efectuate pe transformatoare anterior executate.

Coeficientul de majorare a pierderilor în înfăşurări creşte o dată cu puterea nominală, deoarece la o tensiune dată pierderile suplimentare raportate cresc, în special în înfăşurarea de tensiune mai joasă, ca urmare a măririi ariei secţiunii conductoarelor şi a apariţiei de fisuri în urma încovoierii.

Preţul adoptat al materialelor rezultă din preţurile de catalog majorate cu valoarea manoperei şi a amortizării utilajului indicată de industria

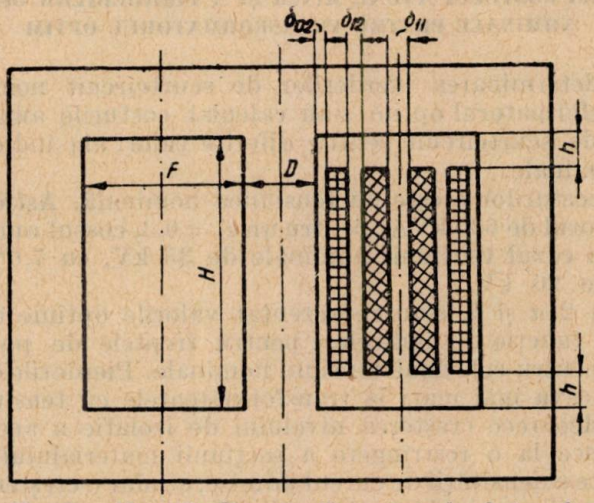


Fig. 1. — Notaţiile dimensiunilor principale ale transformatorului şi ale distanţelor de izolaţie.

noastră producătoare de transformatoare. Aceste valori sînt funcţie de puterea nominală a transformatorului cît şi de tensiunea lui. Întrucît din acest punct de vedere influenţa puterii în interiorul aceleiaşi serii este relativ redusă, în studiu s-a ţinut seama numai de influenţa tensiunii nominale.

Pentru transformatoarele cu înfășurări mixte de Cu—Al s-a adoptat un cost mediat al materialului conductor în așa fel încît să țină seama pe de o parte de poziția înfășurării confecționate din cupru față de cea din aluminiu, și deci de volumul și greutatea acestor înfășurări, iar pe de altă parte de încărcările specifice admisibile.

Costul specific al energiei electrice adoptat corespunde prețului de producție mediu al acestei energii planificat a fi realizat în 1965.

Influența timpului de recuperare i, deși mare asupra valorii absolute a costului total anual, este relativ mică asupra soluției tehnico-economice [1], de aceea nu l-am considerat în prezenta lucrare ca un factor hotărîtor. Avînd în vedere dezvoltarea ulterioară a industriei noastre pe o perioadă imediat următoare, am considerat pentru i o valoare mai scurtă ($i = 6$ ani). Seriile avute în vedere cuprind transformatoare destinate rețelelor de distribuție și consumatorilor industriali. Pe baza unor date statistice cu privire la beneficiarii acestor transformatoare se pot trage unele concluzii în legătură cu valorile aproximative ale indicelui caracterizînd timpul de utilizare la pierderi de scurtcircuit nominale ε care ar trebui să fie adoptate pentru aceste serii. Acest lucru este necesar deoarece indicele de utilizare la pierderi nominale de scurtcircuit influențează în mare măsură [1], [5] soluția tehnico-economică optimă.

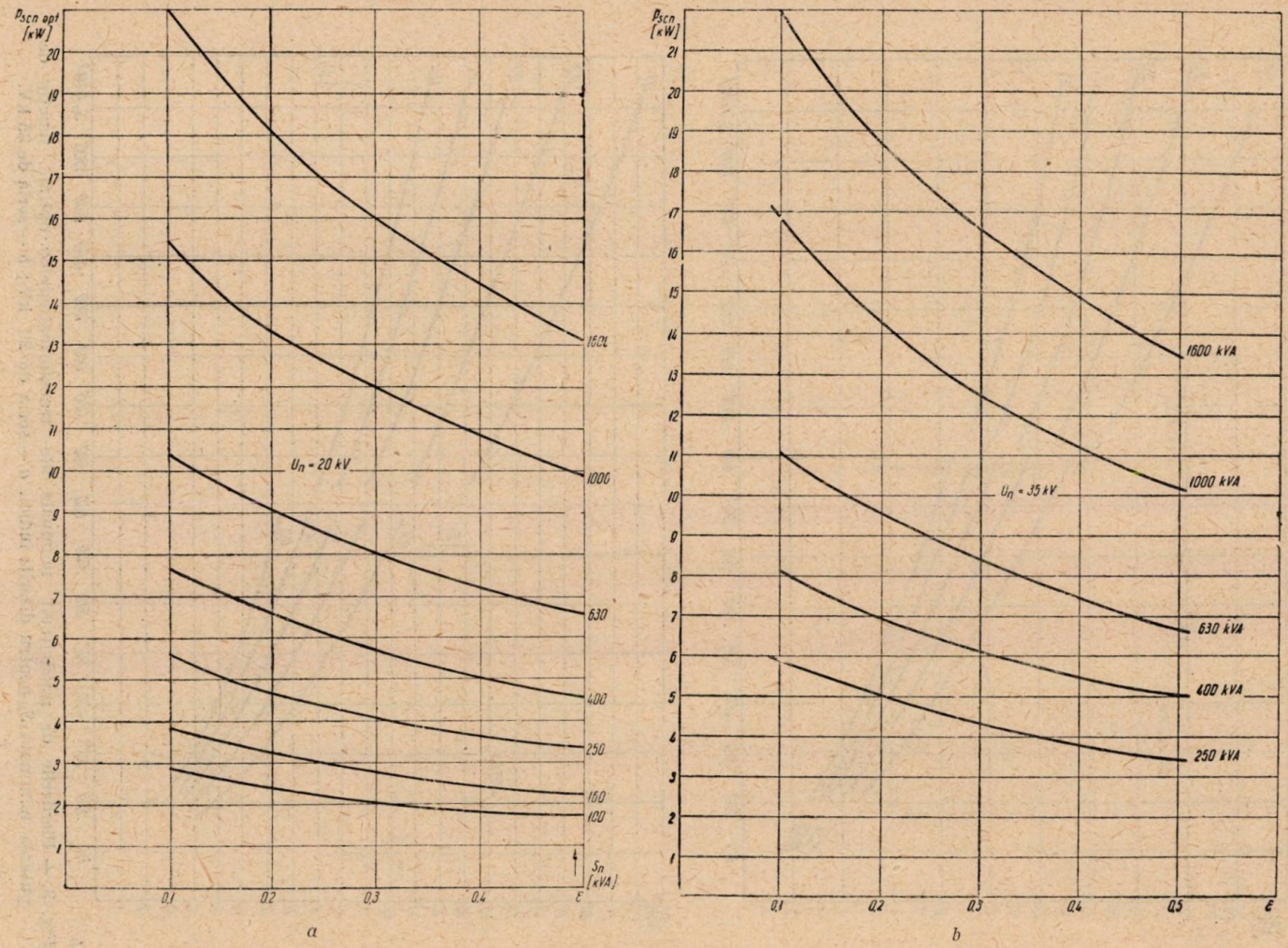
3. DETERMINAREA COSTULUI ANUAL MINIM ȘI A PIERDERILOR DE SCURTCIRCUIT NOMINALE PENTRU TRANSFORMATORUL OPTIM

Pentru determinarea pierderilor de scurtcircuit nominale la care se obține transformatorul optim s-au calculat costurile anuale în funcție de pierderile de scurtcircuit pentru diferite valori ale indicelui ε și diferite puteri nominale.

Nivelul costurilor crește cu tensiunea nominală. Astfel de exemplu la transformatorul de 630 kVA, pentru un $\varepsilon = 0{,}3$, costul anual minim este mai ridicat, în cazul tensiunii nominale de 35 kV, cu 7,6% față de cel al tensiunii de 20 kV.

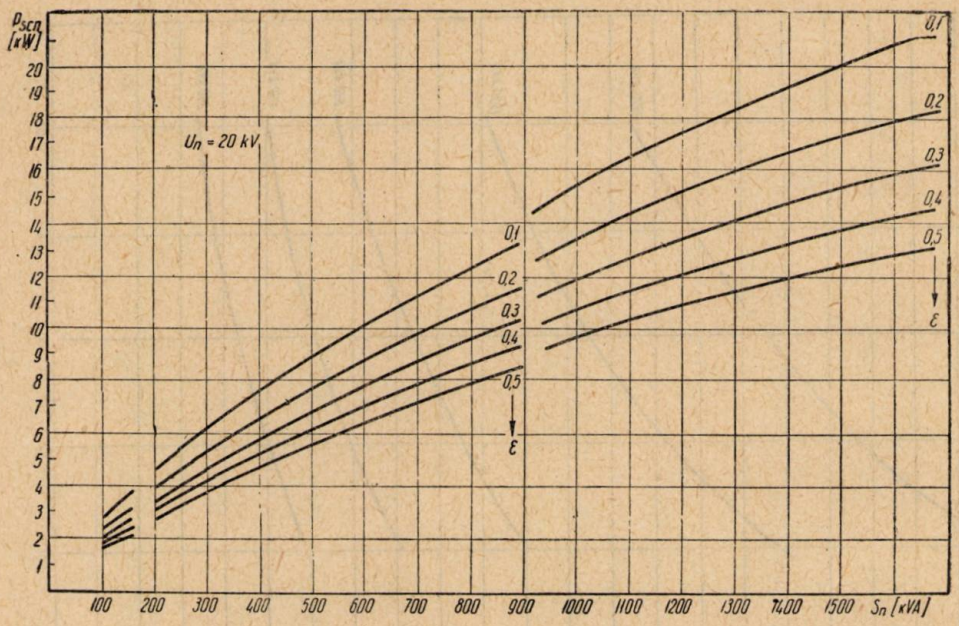
În figura 2 *a* și *b*, s-au reprezentat valorile optime ale pierderilor de scurtcircuit funcție de indicele ε pentru treptele de puteri nominale considerate și pentru cele două tensiuni nominale. Pierderile de scurtcircuit nominale sînt ceva mai mari la transformatoarele cu tensiune nominală mai ridicată, deoarece creșterea nivelului de izolație a acestor transformatoare conduce la o restrîngere a secțiunii materialului conductor și deci la o creștere a densității de curent admise, așadar o creștere a pierderilor de scurtcircuit nominale pentru soluțiile optime. Cum este și normal, pe măsură ce durata de utilizare la pierderi de scurtcircuit nominale crește, valoarea optimă a acestora din urmă scade.

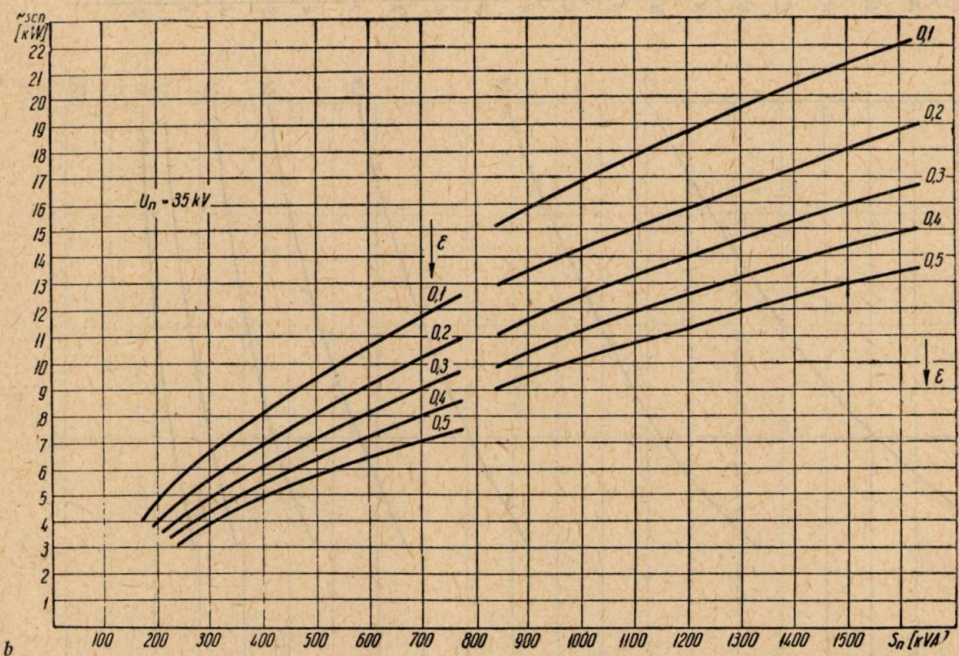
Pierderile de scurtcircuit nominale pentru transformatoarele cele mai economice sînt reprezentate în figura 3 *a* și *b* funcție de puterea nominală pentru diferiți ε și pentru cele două tensiuni nominale. Curbele reprezentative prezintă discontinuități datorită trecerii de la o anumită putere nominală, de la înfășurări de aluminiu la înfășurări mixte (cupru-



a *b*

Fig. 2. — Pierderile de scurtcircuit nominale ale transformatoarelor optime funcţie de ε pentru diferite puteri nominale.
a — seria de 20 kV; *b* — seria de 35 kV.





b

Fig. 3. — Pierderile de scurtcircuit nominale ale transformatoarelor optime funcție de puterea nominală S_n pentru diferiți indici. *a* — seria de 20 kV; *b* — seria de 35 kV.

aluminiu) iar, în cazul tensiunii de 20 kV, încă o categorie de discontinuităţi datorită adoptării unor valori diferite pentru tensiunea de scurtcircuit nominală la transformatoarele de 100 şi 160 kVA. Pierderile de scurtcircuit nominale optime specifice (raportate la puterea nominală) scad pe măsură ce puterea nominală a transformatoarelor creşte.

O dată cu creşterea tensiunii de scurtcircuit, pierderile de scurtcircuit nominale acuză un salt uşor care provine din reducerea relativă a înălţimii înfăşurărilor.

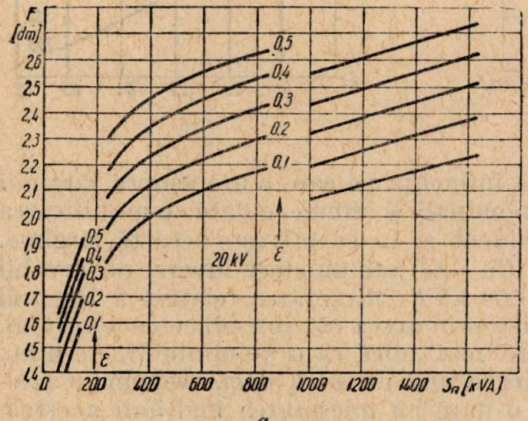
Folosirea înfăşurărilor mixte, în urma faptului că costul lor specific este mai ridicat şi pentru a evita creşterea exagerată a costului materialelor active o parte din această creştere se repartizează în contul cheltuielilor de exploatare, respectiv a pierderilor de scurtcircuit nominale.

4. DIMENSIUNILE PRINCIPALE ALE TRANSFORMATOARELOR

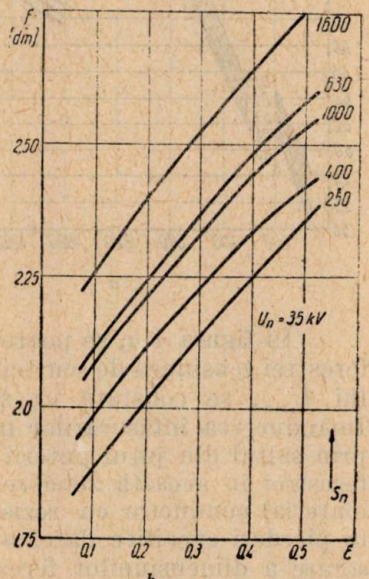
4.1. LĂRGIMEA FERESTREI (F)

Figura 4 *a* reprezintă lărgimea ferestrei F funcţie de puterea nominală la diferiţi ε, pentru transformatoarele optime cu $U_n = 20$ kV. În figura 4 *b*, această lărgime a fost reprezentată funcţie de indicele ε la diferite

Fig. 4. — Lărgimea ferestrei F. *a* — funcţie de puterea nominală S_n pentru diferiţi ε la transformatoarele optime din seria de 20 kV; *b* — funcţie de indicele ε pentru diferite puteri nominale S_n la seria de 35 kV.



a



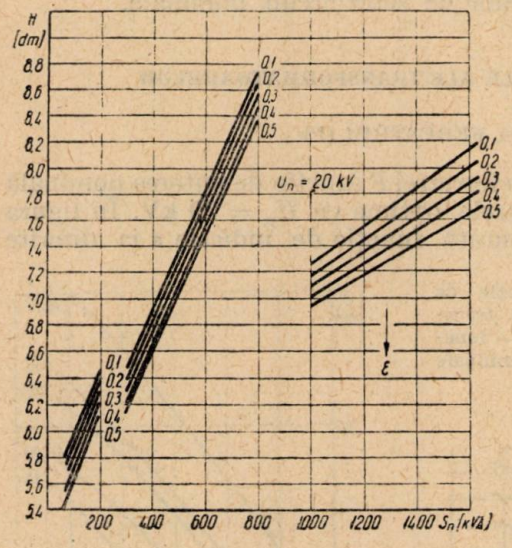
b

puteri nominale pentru transformatoarele optime cu $U_n = 35$ kV. Alegerea diferită a variabilei şi parametrului pentru care s-au făcut reprezentările în cele două cazuri, pe de o parte, se motivează prin faptul că aceste reprezentări, fiecare în parte, scoate în evidenţă o anumită legitate; pe de altă parte, dat fiind uşoara trecere de la un plan de reprezentare la celălalt,

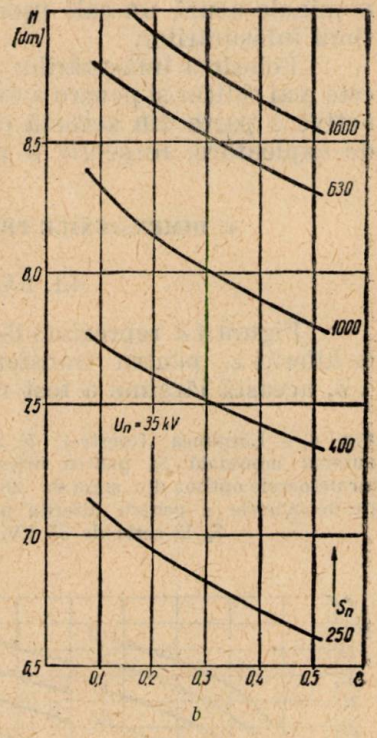
pentru economie de spațiu grafic s-a considerat util acest mod de prezentare. Din punct de vedere cantitativ ambele reprezentări sînt echivalente.

Acest mod de prezentare a rezultatelor studiului efectuat se păstrează și în continuare la analiza celorlalți parametri principali caracteristici transformatoarelor optime din seriile unitare examinate.

Fig. 5. — Înălțimea ferestrei H. a — funcție de puterea nominală S_n pentru diferiți indici ε la transformatoarele optime de 20 kV; b — funcție de indici ε pentru diferitele puteri nominale la transformatoarele optime de 35 kV.



a



b

În figura 4 *a*, se poate vedea influența pe care o are asupra lărgimii ferestrei tensiunea de scurtcircuit nominală și anume, o dată cu modificarea lui U_{sen}, se constată un salt evident și în ce privește această lărgime. Introducerea înfășurărilor mixte (Cu—Al) are un efect invers, observabil prin saltul din jurul puterii de 1 000 kVA. Micșorarea relativă a lărgimii ferestrei în această zonă se explică prin aceea că, introducerea cuprului, material conductor cu rezistivitate mai mică ca a aluminiului, permite, la pierderi specifice date, o încărcare mai mare și, deci, reclamă o micșorare a dimensiunilor ferestrei; o dată cu micșorarea înălțimii acesteia pentru realizarea aceleiași tensiuni de scurtcircuit este necesară o strîmtare a ferestrei.

Figura 4 *b* scoate în evidență variația lărgimii ferestrei funcție de ε. Creșterea lățimii ferestrei cu ε se explică prin faptul că, la ε mai ridicat, pierderile de scurtcircuit ale transformatorului cu cost anual minim sînt în mod necesar mai reduse, ceea ce se realizează prin micșorarea densității de

curent și, ca atare, prin mărirea dimensiunilor ferestrei. Se evidențiază din nou influența introducerii înfășurărilor de compoziție materială mixte prin faptul că curba reprezentativă pentru $S_n = 1\,000$ kVA se situează sub cea pentru $S_n = 630$ kVA.

Influența tensiunii nominale asupra lățimii este foarte mică (F crește foarte puțin cu creșterea lui U_n).

4.2. ÎNĂLȚIMEA FERESTREI (H)

Mai importantă este influența schimbării tensiunii nominale de scurtcircuit asupra înălțimii ferestrei transformatorului (fig. 5 *a* și *b*). Această influență rezultă în principal din cauză că, pentru realizarea tensiunii de scurtcircuit date, efectul înălțimii ferestrei are o pondere mai însemnată decît cel al lărgimii ferestrei, deoarece înălțimea înfășurării determină direct variația acestei tensiuni pe cînd lărgimea ferestrei influențează numai în parte direct (prin canalul de scăpări) această tensiune, lățimea bobinajelor intervenind doar cu a treia parte în expresia ei. La schimbarea tensiunii de scurtcircuit influența este analogă. Scăderea înălțimii ferestrei cu creșterea indicelului ε se explică în același mod cu scăderea lățimii ferestrei.

Din compararea figurii 5 *a* și 5 *b*, se poate constata și influența pe care o are schimbarea tensiunii nominale asupra înălțimii ferestrei transformatorului. Astfel, de exemplu, transformatorul de 630 kVA la $\varepsilon = 0{,}3$ are o înălțime a ferestrei de 0,785 m în cazul tensiunii de 20 kV și de 0,851 în cazul tensiunii de 35 kV; creșterea este evident determinată de creșterea distanței axiale de izolație.

4.3. DIAMETRUL COLOANEI (D)

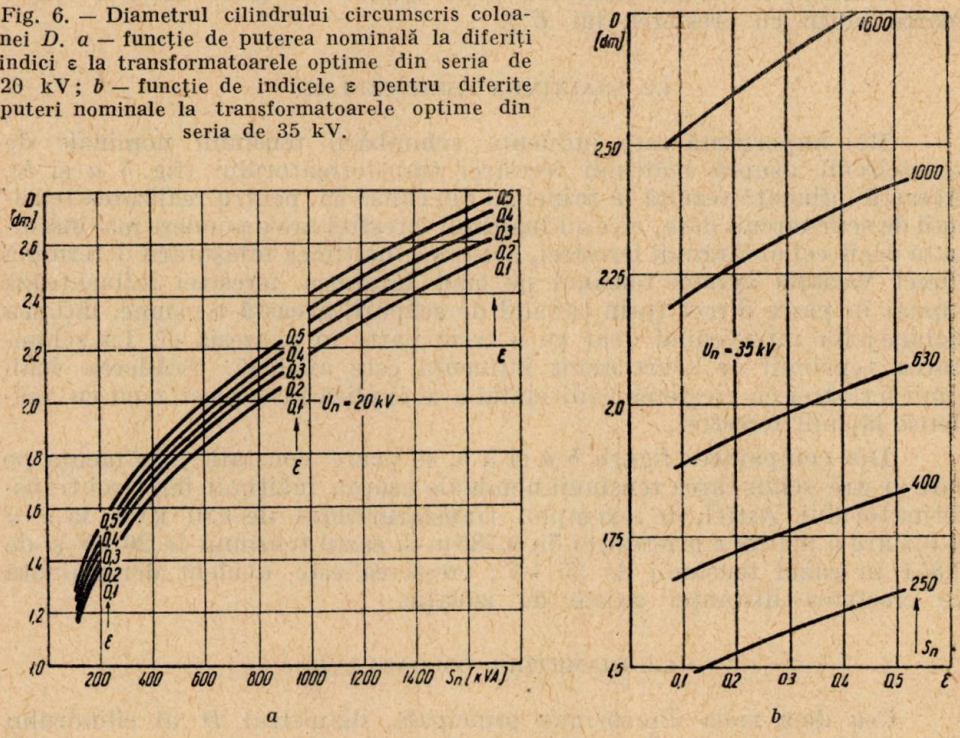
Cea de-a treia dimensiune principală, diametrul D al cilindrului circumscris coloanei, este reprezentată ca funcție de puterea nominală (pentru $U_n = 20$ kV), respectiv de ε (pentru $U_n = 35$ kV) în figura 6 *a* și *b*. Din figura 6 *b*, se poate remarca că discontinuitățile pricinuite de schimbarea tensiunii de scurtcircuit se manifestă în mod diferit de cele pricinuite de alegerea altui material conductor. Mărirea tensiunii de scurtcircuit adoptată necesită o mărire a numărului de spire, așadar, la o tensiune nominală U_n și o inducție în coloana B_a dată, este necesară o micșorare a secțiunii circuitului magnetic și prin urmare a diametrului. Introducerea materialului conductor din cupru reprezintă o creștere a ponderii costului înfășurării față de costul fierului și ca atare conduce la o dimensionare mai largă a acestuia din urmă. Scăderea importantă pe care o suferă înălțimea ferestrei cu această ocazie face necesară creșterea diametrului coloanei (v. și [1], [6]). Figura 6 *b* scoate în evidență creșterea diametrului D al coloanei o dată cu creșterea indicelului ε.

Pentru evitarea creșterii excesive a ponderii cheltuielilor de exploatare în costul total anual al transformatorului înfășurarea acestuia trebuie dimensionată astfel încît să se reducă pierderile de scurtcircuit

nominale, lucru realizabil printr-o creştere corespunzătoare a secţiunii de fier.

Influenţa tensiunii nominale asupra diametrului se poate urmări prin compararea figurii 8 *a* cu 6 *b*. De exemplu, pentru transformatorul de

Fig. 6. — Diametrul cilindrului circumscris coloanei *D*. *a* — funcţie de puterea nominală la diferiţi indici ε la transformatoarele optime din seria de 20 kV; *b* — funcţie de indicele ε pentru diferite puteri nominale la transformatoarele optime din seria de 35 kV.



400 kVA şi ε = 0,3, diametrul este de 0,174 m la seria cu $U_n = 20$ kV şi de 0, 176 m la cea cu $U_n = 35$ kV. După cum se vede influenţa este destul de redusă.

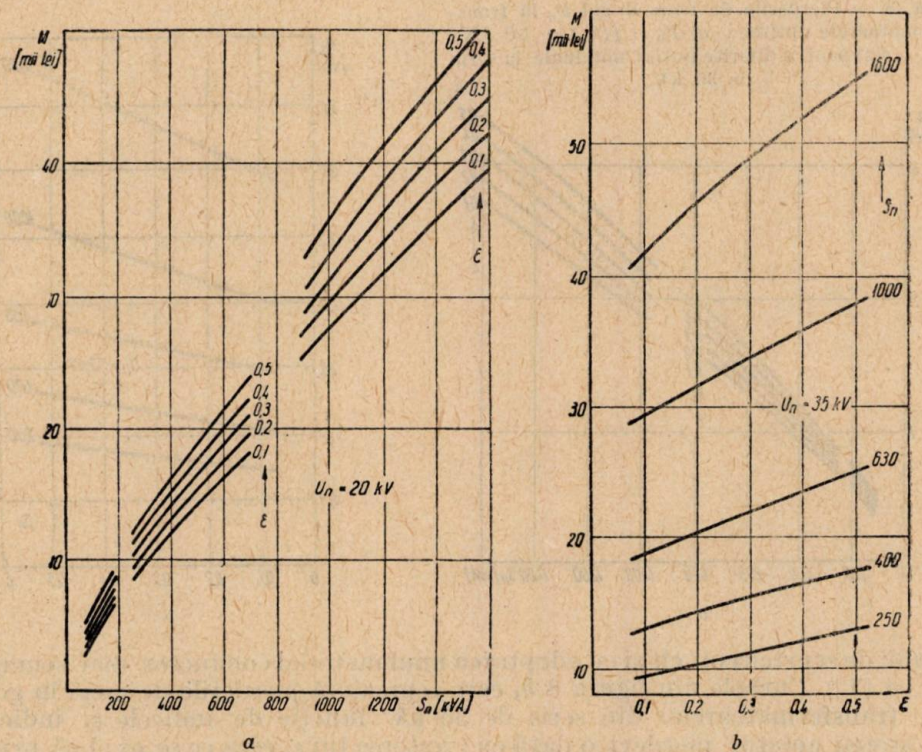
5. COSTUL DE FABRICAŢIE *(M)*

Stabilirea dimensiunilor principale determină la factori de umplere, la material şi la costuri specifice date, costurile de fabricaţie a materialelor active *M*, care sînt reprezentate în figura 7 *a* şi *b*.

În figura 7 *a*, costul de fabricaţie al transformatoarelor optime din seria cu nivel de izolaţie de 20 kV este reprezentat funcţie de puterea nominală, ε fiind parametru. Din aceste curbe se constată că adoptarea unei tensiuni de scurtcircuit superioare, la trecerea de la $S_n = 1600$ kVA la $S_n = 250$ kVA, conduce la o creştere relativ mică a costului materialelor active, în schimb adoptarea înfăşurărilor mixte are drept consecinţă

o creștere mai importantă. Acest fapt se explică prin creșterea substanțială a costului specific al materialului conductor.

Figura 7 *b*, în care costul materialelor active este reprezentat funcție de indicele ε pentru transformatoarele din seria de 35 kV, scoate în evi-



a *b*

Fig. 7. — Costul materialelor active uzinate M a transformatoarelor celor mai economice; *a* — funcție de puterea nominală pentru diferiți indici la seria de 20 kV; *b* — funcție de indicele ε pentru diferite puteri nominale la seria de 35 kV.

dență creșterea acestui cost o dată cu creșterea timpului de utilizare la pierderi de scurtcircuit nominale. Explicația constă în necesitatea echilibrării dintre cheltuielile de exploatare și cheltuielile de investiții principale în vederea obținerii costului minim.

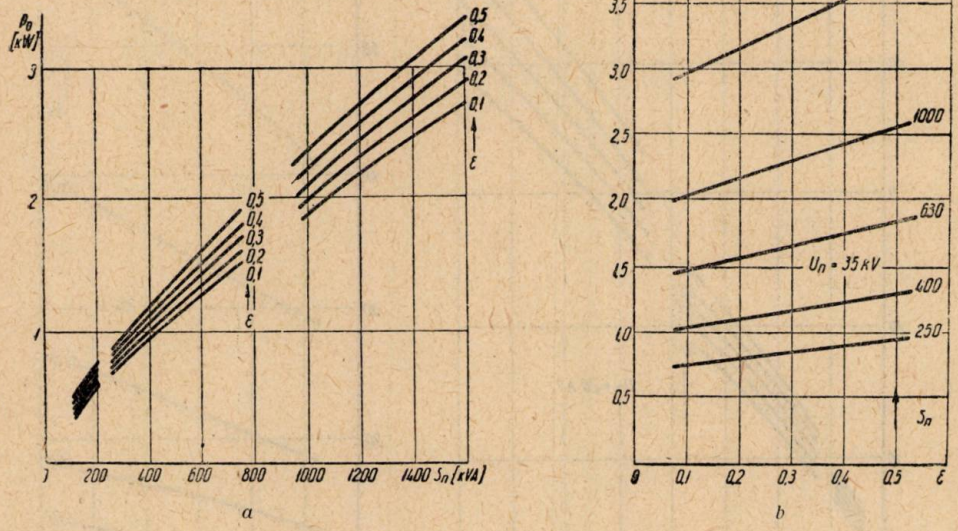
Comparînd figura 7 *a* cu figura 7 *b*, se poate vedea că majorarea tensiunii nominale conduce la o majorare a costului de fabricație, în urma umplerii mai slabe a ferestrei transformatorului cu material conductor.

6. PIERDERILE DE MERS ÎN GOL (P_o)

Printre mărimile importante care caracterizează performanțele transformatoarelor și care sînt de obicei indicate în norme și cataloage figurează și pierderile de mers în gol. La inducție și raport al secțiunilor jugului și

coloanei date, aceste pierderi sînt direct proporționale cu greutatea miezului feromagnetic. Din figura 8 *a*, în care sînt reprezentate aceste pierderi funcție de puterea nominală pentru diferiți ε la seria de transformatoare de 20 kV, rezultă că greutatea fierului scade puțin, atît cu creșterea ten-

Fig. 8. — Pierderile de mers în gol P_0 la transformatoarele optime : *a*) $P_0 = f(S_n)$ la 20 kV; $P_0 = f(\varepsilon)$ pentru diferite puteri nominale la seria de 35 kV.



siunii de scurtcircuit cît și cu adoptarea unui material conductor mai scump (v. și [1]). Curbele din figura 8 *b*, care reprezintă pierderile de mers în gol ale transformatoarelor din seria de 35 kV funcție de indicele ε, indică creșterea acestor pierderi o dată cu creșterea lui ε, ceea ce se explică prin creșterea greutății ca urmare a reducerii pierderilor de scurtcircuit nominale.

Comparînd figurile 8 *a* și 8 *b*, se constată că mărirea tensiunii nominale conduce la creșterea pierderilor de mers în gol, în condiții în rest egale, ca urmare a factorului de umplere a ferestrei mai defavorabil la tensiunea mai mare.

8. ÎNCHEIERE

Considerăm util și corespunzător scopului propus la elaborarea studiului de față să comparăm soluțiile obținute în primul rînd cu seriile mai vechi de transformatoare din aceeași gamă de puteri executate de industria noastră. Seriile vechi cu circuitul magnetic din tablă laminată la cald dar cu înfășurări tot din aluminiu au fost proiectate pe baze de considerente numai tehnice și nu și economice.

În al doilea rînd este interesant să se urmărească modul și măsura în care proiectarea concretă a transformatoarelor din seria nouă, efectuată

de Uzinele Electroputere, conduce la unele abateri în ceea ce privește dimensiunile principale, costul materialelor active, nivelul pierderilor și costul total anual, abateri provenite din necesități tehnice și tehnologice care au fost luate în considerare la proiectarea de detaliu.

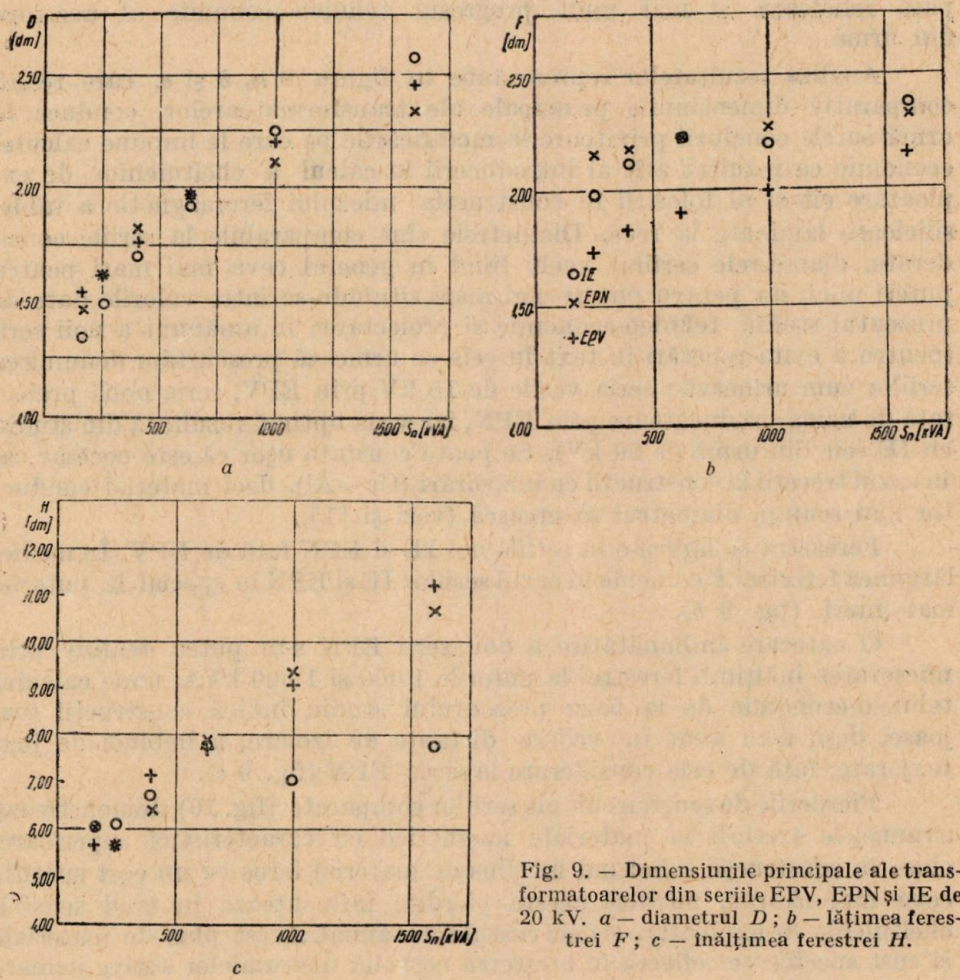


Fig. 9. — Dimensiunile principale ale transformatoarelor din seriile EPV, EPN și IE de 20 kV. *a* — diametrul D; *b* — lățimea ferestrei F; *c* — înălțimea ferestrei H.

Comparația între soluțiile seriilor amintite pentru cazul tensiunii de 20 kV este ilustrată în figurile 9 și 12 unde seria veche s-a reprezentat cu + seria nouă proiectată cu × seria rezultată din prezentul studiu cu ○.

Indicele corespunzător timpului de utilizare la pierderi de scurtcircuit nominale a fost considerat în toate cele trei cazuri ca fiind $\varepsilon = 0{,}15$ pentru transformatoarele de 100 și 160 kVA și $\varepsilon = 0{,}20$ pentru restul transformatoarelor din serie.

Dat fiind că seria veche avea o izolație corespunzătoare tensiunii de 15 kV, rezultă că diferențele ce apar la transformatoarele din această serie și seriile noi sînt oarecum dintr-un început micșorate; așadar, raportarea seriei vechi la tensiunea de 20 kV a seriilor noi cu care se compară reliefează și mai mult progresul tehnico-economic al acestora din urmă.

Analiza rezultatelor reprezentate în figura 9 *a*, *b* și *c*, care redau comparativ dimensiunile principale ale transformatoarelor, conduce la următoarele concluzii privitoare la modificările pe care le impune calculul economic ca rezultat atît al introducerii în calcul a cheltuielilor de exploatare cît și al folosirii în construcția miezului feromagnetic a tablei silicioase laminate la rece. Diametrele sînt comparabile la seriile considerate, diametrele seriilor vechi fiind în general ceva mai mari pentru puteri mici, iar pentru puteri mai mari situîndu-se între valorile date de prezentul studiu tehnico-economic și proiectarea în amănunt a noii serii (pentru a evita repetări în text în cele ce urmează prescurtăm denumirea seriilor cum urmează: seria veche de 15 kV prin EPV, seria nouă proiectată de uzina producătoare prin EPN, iar seria optimă rezultată din studiu cu IE cele din urmă de 20 kV). Se poate constata ușor că este necesar ca, în cazul trecerii la construcții cu înfășurări (Cu—Al), deci material conductor mai scump, diametrul să crească (vezi și [1]).

Fereastra se lărgește în seriile noi IE și EPN față de EPV. În medie, lărgimea ferestrei F coincide în cazul seriilor IE și EPN în special la puterile mai mari (fig. 9 *b*).

O oarecare îmbunătățire a noii serii EPN s-ar putea realiza prin micșorarea înălțimii ferestrei la puterile 1 000 și 1 600 kVA, unde calculul tehnico-economic de la baza prezentului studiu indică construcții mai joase, deși, s-au avut în vedere distanțe de izolare, a bobinei de jug, majorate, față de cele considerate la seria EPN (fig. 9 *c*).

Pierderile de scurtcircuit ale seriilor comparate (fig. 10) demonstrează avantajele trecerii la materiale magnetice cu caracteristici superioare, chiar în construcții solicitînd un plus de material feros cu un cost specific ceva mai ridicat, întrucît aceste pierderi influențează în mod sensibil cheltuielile de exploatare și deci costul total anual. Acest plus de materiale și cost specific se reflectă în creșterea costului materialelor active uzinate (reprezentat comparativ în figura 11) unde, pentru seriile noi IE și EPN acest cost rezultă ceva mai mare decît la seria veche EPV. Această creștere este însă supracompensată de reducerea costului total anual (fig. 12) ca urmare a micșorării relativ sensibilă a cheltuielilor de exploatare.

Un calcul simplu arată că, creșterea costului de fabricație (M) este recuperat prin economiile realizate în exploatare în timp relativ scurt, cu mult mai redus decît timpul de recuperare normat și chiar decît cel admis în studiul de față (de 6 ani). Astfel în cazul concret al transforma-

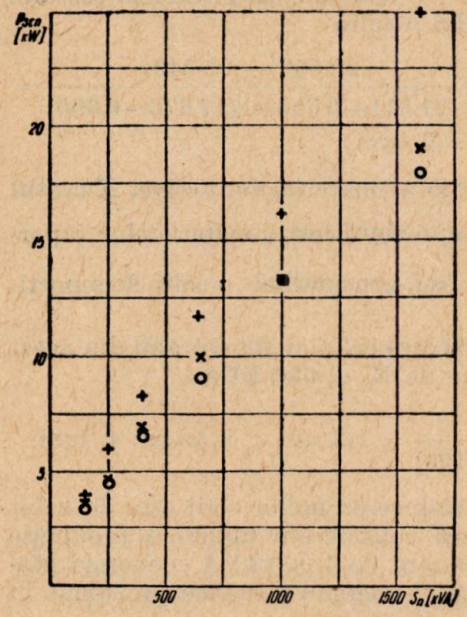


Fig. 10. — Pierderile de scurtcircuit nominale P_{scn} ale transformatoarelor din seriile EPV, EPN și IE.

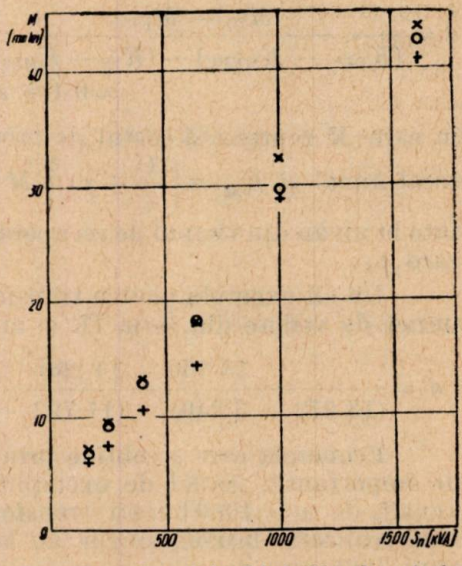


Fig. 11. — Costul de fabricație al materialelor active M al transformatoarelor din seriile EPV, EPN și IE.

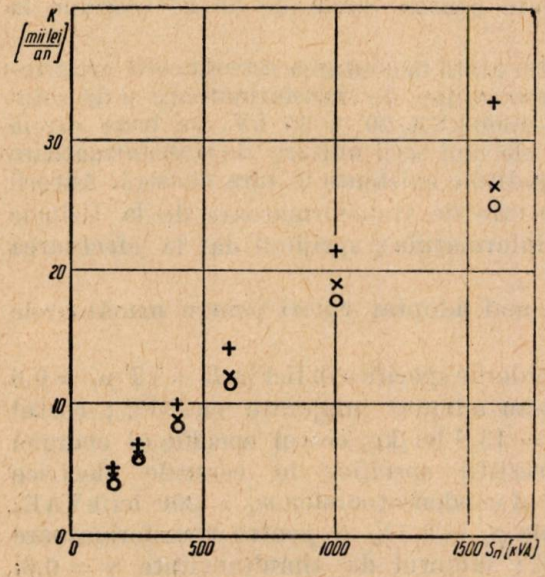


Fig. 12. — Costul total anual K al transformatoarelor din seriile EPV, EPN și IE.

torului de 1000 kVA, timpul (d) în care se recuperează creșterea costului de fabricație de la seria EPV la seria IE rezultă

$$d = \frac{M_{IE} - M_{EPV}}{(K_{EPV} - K_{MEPV}) - (K_{IE} - K_{MIE})} = \frac{29\,500 - 28\,840}{(21\,511 - 6\,550) - (17\,676 - 6\,690)} =$$
$$= 0{,}166 \text{ ani} = 2 \text{ luni},$$

în care M reprezintă costul de fabricație al materialelor active, K costul total anual și $K_M = \left(\frac{1}{i} + p_T\right) M$ — reprezintă costul materialelor raportate la un an din timpul de recuperare i ani, considerînd o cotă de amortizare p_T.

Un alt exemplu pentru transformatorul cel mai defavorabil din acest punct de vedere din seria IE și anume de $S_n = 630$ kVA

$$d = \frac{18\,300 - 14\,290}{(13\,972 - 3\,240) - (11\,722 - 4\,150)} = 1{,}3 \text{ ani} < 1 \text{ an și } 4 \text{ luni}.$$

Economia care se obține prin introducerea noilor serii este deosebit de importantă. Astfel de exemplu dacă considerăm numai o producție anuală de $n = 1000$ bucăți transformatoare de 1 000 kVA economia globală realizată într-un singur an la costul energiei electrice prezumat în anul 1965 este de

$$E = (K_{EPV} - K_{IE}).\ n = (21\,511 - 17\,676).\ 1\,000 = 3\,835\,000 \text{ lei/an}.$$

Aceste economii sînt în realitate mai mari, deoarece comparația s-a făcut cu seria veche EPV de 15 kV și nu 20 kV.

Calculele economice efectuate pentru seria de 35 kV conduc la rezultate asemănătoare.

În concluzie, prezentul studiu arată necesitatea introducerii criteriului tehnico-economic în proiectarea seriilor de transformatoare și dă soluția generală pentru seriile de 100—1600 kVA, 20 și 35 kV, pe baza căreia se pot analiza proiectele tehnice ale noii serii unitare de transformatoare din această gamă de putere în condițiile existente în țara noastră. Autorii mulțumesc colectivului de proiectare de transformatoare de la Uzinele Electroputere — Craiova pentru informațiile și sprijinul dat la efectuarea acestui studiu.

În calculele efectuate s-au mai adoptat valori pentru următoarele mărimi :

Limita de reglaj $\pm 5\%$; pierderile specifice în fier la $B = 1T$ $p_1 = 0{,}6$ W/kg, pierderile totale în fier s-au adoptat majorate cu 20% ; costul specific al tolei împachetate $m_{Fe} = 13{,}8$ lei /kg, costul specific al energiei electrice $m_e = 0{,}13$ lei/kWh, investiții specifice în centrale electrice $m_c = 2700$ lei/kW, costul specific al condensatoarelor $m_k = 200$ lei/kVAR, cotele de amortizare pentru centrale $p_c = 5{,}3\%$ și pentru transformatoare și condensatoare $p_T = p_k = 6\%$; factorul de simultaneitate $\gamma = 0{,}6$.

Anexa

— **Valori utilizate în calculul tehnico-economic al seriilor de transformatoare de 100 ... 1 600 kVA şi 20 respectiv 35 kV**

Denumirea indicelui / Puterea nominală	S_n	kVA	100	160	250	400	630	1 000	1 600
Factorul de umplere a secţiunii bobinei cu material conductor	K_{Al} K_{CuAl}	A*)	0,50	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57
		B	—	—	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55
Distanţa de la cercul circumscris coloanei la înfăşurarea secundară	δ_{02}	A	8	8	9,5	9,5	9,5	12	12
		B	—	—	9,5	9,5	9,5	12	12
Distanţa între înfăşurările de mai joasă şi mai înaltă tensiune	δ_{12}	A	17	17	17	17	17	17	17
		B	—	—	24	24	24	24	24
Distanţa dintre înfăşurările de tensiune mai înaltă	δ_{11}	A	15	15	15	15	15	15	15
		B	—	—	18	18	18	18	18
Suma distanţelor de la jug la bobine	2h	A	84	84	84	84	104	104	104
		B	—	—	130	130	150	150	150
Costul specific al materialului conductor uzinat	m_{Al} m_{CuAl}	A	30	30	30	30	30	37	37
		B	—	—	37	37	37	41,5	41,5
Factorul de majorare al pierderilor de scurtcircuit	K_λ	A, B	1,053	1,053	1,075	1,075	1,10	1,125	1,162
Tensiunea de scurtcircuit	U_{scn}	A, B	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Greutatea specifică a materialului conductor	γ_{Al} γ_{CuAl}	A, B	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	4,25	4,25
Pierderi specifice în conductor pentru densitatea $j = 1$ A/mm²	p	A, B	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	8,44	8,44

*) Tipul *A* se referă la transformatorul cu tensiunea mai înaltă egală cu 20 kV iar tipul *B* la cel cu tensiunea mai înaltă $U_n = 35$ kV.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РАЗМЕРЫ СЕРИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ МОЩНОСТЬЮ В 100 — 1 600 ква, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ

Исследуется вопрос определения основных характеристик и размеров двух серий трансформаторов мощностью от 100 до 1600 ква и напряжением выше 20 и 35 кв, на основе технических и экономических

соображений, характерных для условий РНР. После изложения общих данных метода и технико-экономических показателей и их значений определяется минимальная годовая стоимость , в которую входит стоимость производства, отнесенная ко времени рекуперации, в том числе доля амортизации, и эксплуатационные расходы при различных значениях показателя годового использования при номинальных потерях.

Определяются потери вследствие короткого замыкания, соответствующие минимальной годовой стоимости, в зависимости от которых устанавливаются ширина и высота окна, диаметр опоры, производственная стоимость активных материалов, потери и намагничивающая мощность холостого хода.

Исследование заключается сравнительным экономическим расчетом, в котором учитываются: старая серия трансформаторов, вновь спроектированная серия, а также и данные, вытекающие из настоящей работы; при этом, в последних двух случаях использовалась холоднокатанная кремнистая листовая сталь.

BIBLIOGRAFIE

1. D. CRETU, M. BÎRGĂUANU, P. OPRIŞAN, *Influenţa variaţiei indicilor tehnico-economici asupra soluţiei optime a transformatoarelor de putere.* St. cerc. energ. seria A, **13**, *1*, 73—106 (1963).
2. C. V. BĂLĂ, A. G. CUPŞA, *Determinarea optimului tehnico-economic absolut în proiectarea transformatoarelor de putere.* St. cerc. energ., seria A, **13**, *1*, 107—124 (1963),
3. C. APETREI, *Determinarea prin calcul a optimului tehnico-economic a transformatorului de putere.* St. cerc. energ., Seria A, **12**, *4* (1962).
4. I. POPOV, *Eine Methode zur Bestimmung der optimalen Abmessungen der Kerne von Leistungstransformatoren.* Deutsche Elektrotechnik, **12**, *7*, 243—248 (1958).
5. M. E. BÎRGĂUANU, D. V. CRETU, C. V. BĂLĂ, *Cu privire la determinarea soluţiilor optime a unei serii unitare de transformatoare de putere pe bază de considerente tehnice şi economice.* St. cerc. energ., seria A, **13**, *1*, 125—139 (1963).
6. M. E. BÎRGĂUANU, D. V. CRETU, *Transformatoare cu cupru sau cu aluminiu?* St. cerc. energ., seria A, **13**, *2* (1963).

MĂSURAREA ABATERILOR DE TENSIUNE ÎN REȚELE ELECTRICE

DE

E. ARIE și H. CRISTEA

621.317.32.015.2 : 621.316.1

1. SCOPUL ÎNREGISTRĂRII ABATERILOR DE TENSIUNE ȘI CONDIȚIILE IMPUSE APARATULUI FOLOSIT

Cunoașterea valorilor abaterilor tensiunii față de valoarea nominală, precum și a duratelor acestor abateri, în diferite noduri ale unei rețele, prezintă o mare importanță pentru caracterizarea calității reglajului tensiunii în rețeaua respectivă. În ultimul timp, cîștigă din ce în ce mai mult teren metoda utilizării indicelui integral introdus în Franța și cunoscut sub denumirea de „iregularitatea tensiunii" sau „criteriul Ailleret" ca indice sintetic al calității reglajului tensiunii [1], [2], [3], [4].

Expresia acestui indice, este

$$I_T = \frac{10\,000}{T} \sum_{\lambda}^{n} \int_0^T P_i(t)\,[u_i(t) - 1]^2\,dt, \tag{1}$$

unde

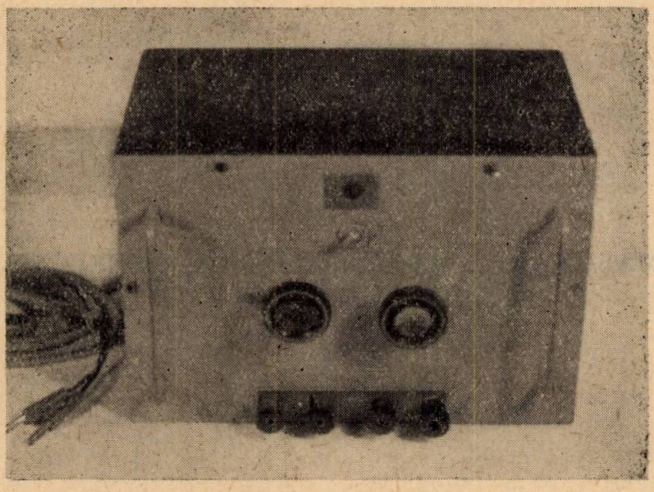
$P_i(t)$ și $u_i(t)$ sînt valoarea puterii cerute de consumator și valoarea relativă a tensiunii în nodul i, la momentul t;

n este numărul nodurilor rețelei;

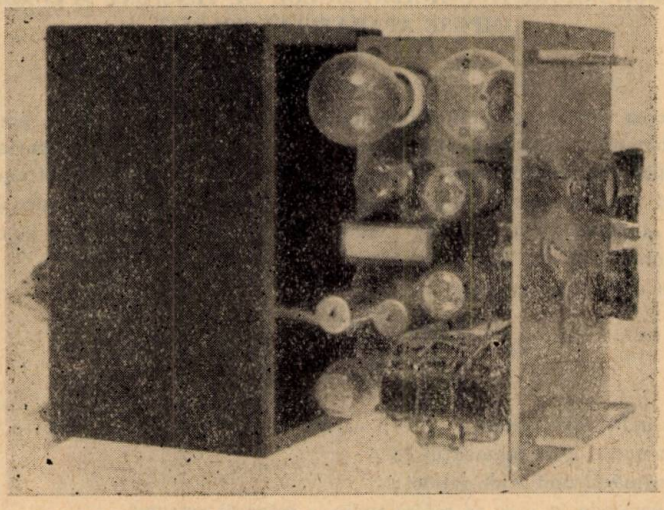
T este perioada la care se referă indicele integral calculat.

În Franța, o dată cu introducerea acestui indice, a fost construit și un aparat denumit voltmetru statistic [3], [5], care elaborează direct mărimea

$$I_{T,i} = \frac{1}{T} \int_0^T P_i(t)\,[u_i(t) - 1]^2\,dt. \tag{2}$$



a



b

Fig. 1. — Ansamblul conținînd traductorul și amplificatoarele
a — cu carcasă ; *b* — fără carcasă.

Menționăm că acest indice este utilizabil în una din următoarele ipoteze :

a) Dacă valoarea daunelor produse consumatorilor în unitatea de timp este proporțională cu pătratul abaterii tensiunii de la valoarea nominală, pentru o lege oarecare de repartiție statistică a abaterilor tensiunii ;

b) În cazul unei legi normale de repartiție a abaterilor tensiunii, ca mijloc de determinare a oricărui alt indice statistic al acestor abateri de tensiune, în cazul în care dependența daunelor produse consumatorilor, de valoarea și durata abaterilor de tensiune, este descrisă de o lege oarecare — diferită de cea pătratică.

Astfel, pentru generalizarea aplicării criteriului Ailleret, sau a altui indice integral, sînt necesare cercetări prealabile asupra legii de repartiție a abaterilor de tensiune în rețele și asupra legii de dependență a daunelor de valoarea și durata abaterilor de tensiune [17].

În afară de aceasta, în cercetarea funcționării și a optimizării dezvoltării sistemelor energetice, mai sînt necesari și alți indici sau funcții ce caracterizează abaterile de tensiune ca funcții statistice și anume :

— coeficienții de corelație cu variațiile frecvenței, cu fluctuațiile puterii perturbatoare active sau reactive sau cu fluctuațiile puterii pe linii de interconexiune — necesari pentru : determinarea caracteristicilor nodale ale sistemului , sau anumitor părți ale unui sistem ; determinarea sarcinilor perturbatoare echivalente, raportate la nodul respectiv ; precalcularea efectelor transformatoarelor și autotransformatoarelor cu prize reglabile, sau ale condensatoarelor reglabile ; precalcularea fluctuațiilor pe legături de interconexiune proiectate [3], [6] [7], [8], [9] ;

— funcțiile de autocorelație sau densitatea spectrală, necesare în studiul efectelor flicker-ului, a mijloacelor de reducere a acestor efecte [10], [11] sau pentru optimizarea regulatoarelor de prize ale transformatoarelor [12], [13].

Pentru cercetările amintite, a fost realizat la Institutul de energetică al Academiei R.P.R., un înregistrator al abaterilor de tensiune (fig. 1), prelucrarea datelor înregistrate fiind făcută ulterior cu ajutorul unui calculator electronic cifric sau analogic [5], [14] soluție mai elastică, deci mai potrivită pentru efectuarea unor cercetări variate decît aceea a utilizării unor aparate specializate care elaborează o singură mărime integrală chiar la locul măsurătorii.

Pentru a corespunde scopului, aparatul de înregistrare a abaterilor de tensiune trebuia să îndeplinească următoarele condiții :

— să aibă o mare sensibilitate, pentru a urmări variațiile de tensiune de ordinul $\frac{uN}{1\,000}$ ce însoțesc variațiile momentane ale unor sarcini locale ;

— să aibă o caracteristică liniară în domeniul variațiilor de tensiune ce apar în regim

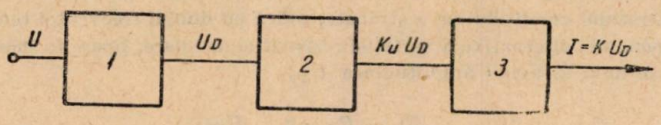


Fig. 2. — Schema bloc.

normal într-un nod al rețelei ; acest domeniu este în mod obișnuit de circa 10% din tensiunea nominală, fiind centrat pe o valoare medie, situată în intervalul 95 — 105% din tensiunea nominală ;

— constanta de timp să fie astfel aleasă încît să permită înregistrarea fluctuațiilor de tensiune cu frecvențe maxime de ~10 Hz, care interesează în probleme privind flicker-ul [3] ;

— caracteristica să depindă cît mai puțin de forma curbei tensiunii de intrare, pentru a da posibilitatea efectuării cercetărilor în noduri la care sînt conectați consumatori cu un puternic efect deformant (cuptoare electrice, redresoare, instalații de sudură), deoarece deseori tocmai în aceste noduri trebuie studiată reducerea variațiilor tensiunii sau a flicker-ului.

Aparatul realizat pentru a corespunde cerințelor amintite, se compune din patru elemente (fig. 2): *a*) traductorul pentru măsurarea abaterilor de tensiune *1*, cu schemă în punte, folosind rezistențe neliniare; *b*) amplificatorul de tensiune *2*; *c*) amplificatorul de putere *3*; *d*) înregistrator.

2. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE ȘI PERFORMANȚELE TRADUCTORULUI DE ABATERI DE TENSIUNE

Pentru măsurarea abaterilor de tensiune se cunosc în literatura tehnică diferite metode, folosite la realizarea voltmetrelor cu suprimarea domeniului inițial [15]. Dintre aceste metode pentru a obține o măsură independentă de forma undei de tensiune, se recomandă folosirea unor rezistențe neliniare formate din lămpi cu incandescență [16]; constanta de timp a acestora satisface necesitățile studierii unor variații de tensiune cu o frecvență maximă de 10 Hz. Neliniaritatea puțin accentuată a acestor elemente a făcut necesară realizarea unei scheme în punte (fig. 3).

În figura 4 sînt reprezentate caracteristicile elementelor neliniare (lămpilor) R_L, precum și ale rezistențelor neliniare $R_0 + \rho$ din brațele punții. În curent continuu, pe porțiunea $U = U_0 \pm \Delta U$, unde caracteristica neliniară poate fi aproximată cu o dreaptă avînd panta

$$\operatorname{tg} \varphi_L = R_L ,$$

tensiunea de dezechilibru a punții U_D are expresia

$$U_D = \frac{R_L - R_0 - \rho}{R_L + R_0 + \rho} \Delta U ; \quad \Delta U = U - U_0 . \tag{3}$$

Tensiunea U_0 la care puntea este în echilibru este tensiunea de referință. În cazul alimentării cu o tensiune sinusoidală, valoarea medie a rezistenței neliniare depinde de temperatura acesteia, deci de media pătratică a curentului ce o străbate, respectiv de valoarea eficace a tensiunii aplicate punții.

Acestei valori medii a rezistenței neliniare îi corespunde componenta principală a tensiunii măsurate la ieșirea punții U_D, componentă avînd forma undei tensiunii aplicate la intrare U și amplitudinea proporțională cu diferența dintre valoarea eficace a acestei tensiuni și tensiunea U_0. Rezistența neliniară va varia însă în jurul valorii medii, cu o frecvență egală cu frecvența pătratului curentului ce o străbate, adică cu dublul frecvenței tensiunii aplicate. Din cauza componentei alternative a variației rezistenței neliniare, apare în mărimea de ieșire, o armonică de ordinul 2, avînd amplitudinea U_{D_2}

$$U_{D_2} \approx \frac{R_L - R_0 - \rho}{R_L + R_0 + \rho} \cdot \frac{U_{max}}{2 T_L \omega} , \tag{4}$$

unde T_L este constanta de timp a elementului neliniar.

Prin măsurarea valorii eficace a mărimii de ieșire a punții, se obține astfel o mărime ce conține un termen proporțional cu abaterea mărimii eficace a tensiunii aplicate de la valoarea de referință și un termen constant, egal cu valoarea eficace a armonicii 2 a tensiunii de ieșire·

Din relaţia (4) rezultă că pentru $T_L = 0{,}25$ s, termenul constant este egal cu valoarea termenului proporţional corespunzătoare unei abateri de tensiune de 0,65%.

Dacă tensiunea aplicată la intrare este nesinusoidală, valoarea eficace a termenului proporţional va rămîne proporţională cu abaterea valorii eficace a tensiunii aplicate faţă de valoarea de referinţă. Pentru factorii deformanţi uzuali, eroarea asupra acestui termen rămîne

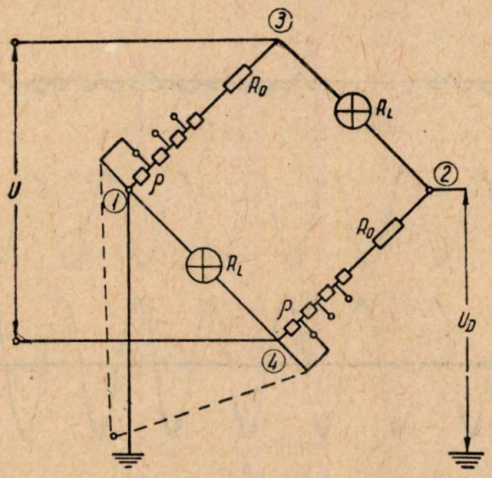


Fig. 3. — Schema de principiu.

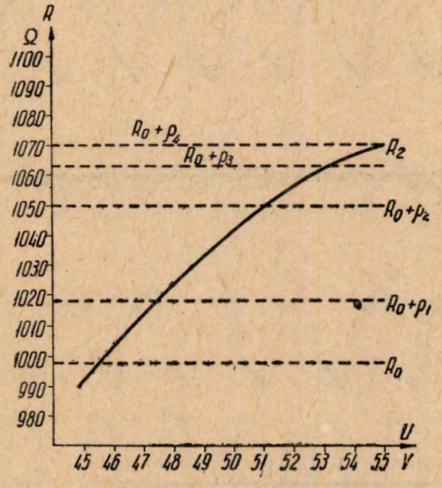


Fig. 4. — Caracteristicile lămpilor cu incandescenţă.

neglijabilă, chiar dacă aparatul conectat la ieşire măsoară o altă medie decît cea pătratică, deoarece factorul deformant al termenului proporţional al mărimii de ieşire este egal cu acela al mărimii de intrare.

Conform relaţiei (4), contribuţia armonicilor la componentele de frecvenţă diferită de cea a tensiunii aplicate este invers proporţională cu ordinul acestor armonici, astfel încît acest

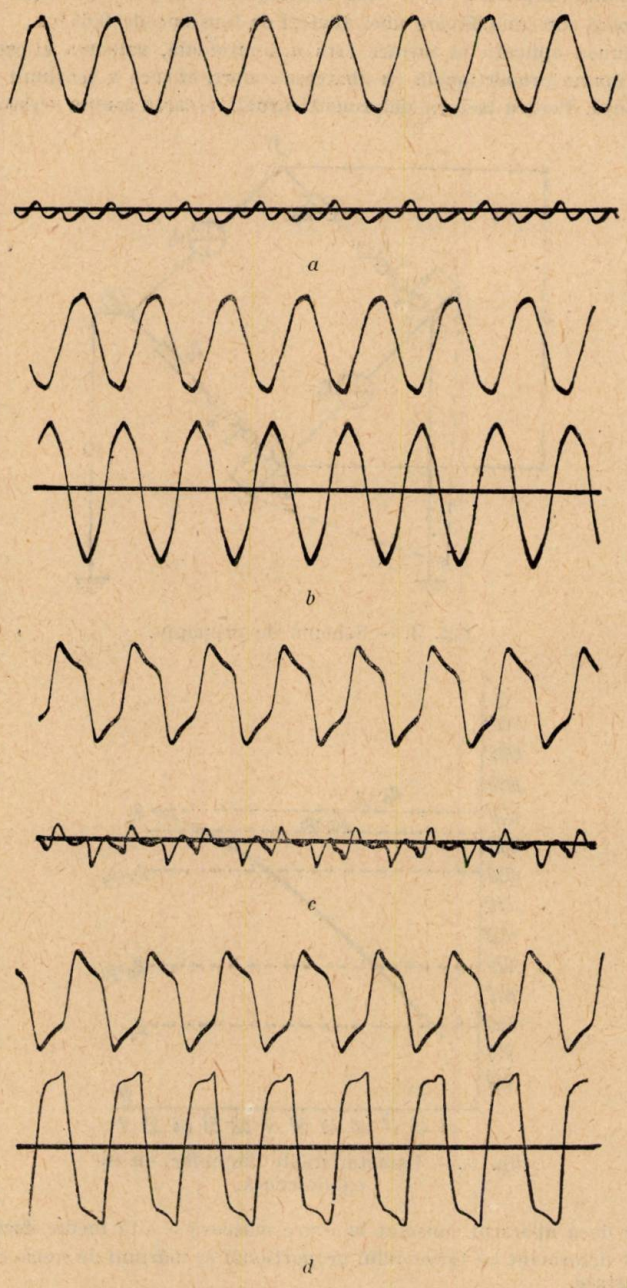


Fig. 5. — Oscilogramele tensiunilor la intrarea și ieșirea traductorului. *a* — undă sinusoidală ; *b* — undă sinusoidală ; *c* — undă nesinusoidală ; *d* — undă nesinusoidală.

efect poate fi neglijat pentru factorii deformanți uzuali : aceste componente se vor reflecta deci într-un termen constant, independent de forma undei de tensiune aplicată.

În figura 5 se prezintă pentru verificare oscilogramele tensiunilor la intrarea și ieșirea traductorului, pentru un regim sinusoidal și pentru un regim puternic deformat, la valori eficace ale tensiunilor de intrare egale cu U_0 și $U_0 - 5\%$.

Se observă că termenul de frecvență dublă, care pentru $U = U_0$ apare izolat, este independent de forma undei și de valoarea eficace a mărimii de intrare.

Curbele de etalonare ale traductorului (fig. 6) arată că erorile datorite neliniarității sînt imperceptibile în domeniul $U_0 - 15\% \leqslant U \leqslant U_0 + 15\%$.

Deoarece în curent alternativ, aparatul nu permite sesizarea semnului abaterii tensiunii de intrare, față de valoarea de referință U_0, se poate folosi numai jumătate din domeniul de liniaritate, pentru a evita neunivocități.

Se folosește de aceea domeniul $U_0 - 15\% \leqslant U \leqslant U_0$, alegîndu-se valoarea de referință U_0 astfel încît valoarea medie a tensiunii din nodul în care se fac înregistrările să se găsească aproximativ în mijlocul intervalului (la $U_0 - 7{,}5\%$). Pentru variațiile uzuale de tensiune într-un nod, acest domeniu este suficient.

Valoarea medie a tensiunii diferă însă de la un nod la alt nod al unei rețele. S-a prevăzut de aceea posibilitatea modificării tensiunii de referință prin rezistențele ρ, reglabile în cinci

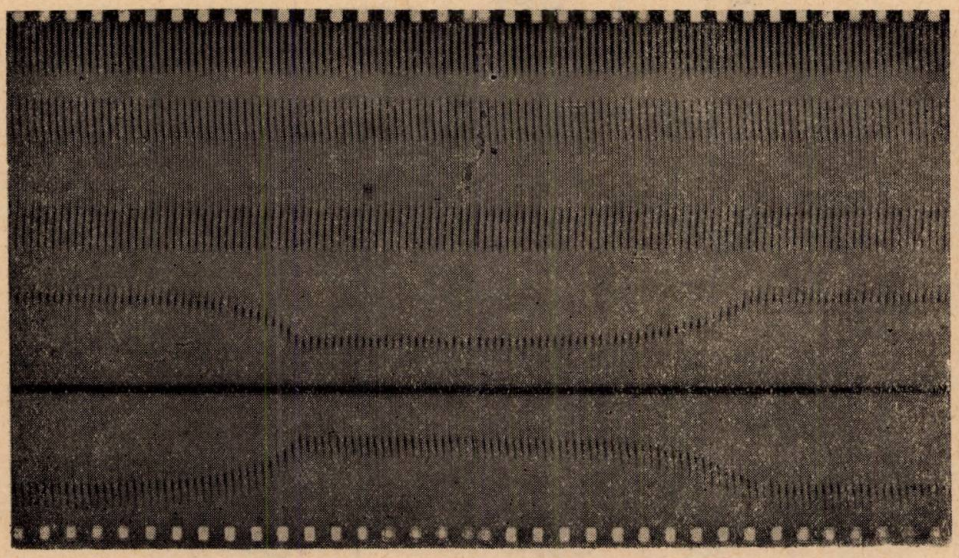


Fig. 6. — Oscilogramele tensiunilor la ieșirea traductorului, în regim dinamic.

trepte, cu ajutorul unui comutator dublu cu cinci poziții. Tensiunea de referință U_0 poate lua astfel valorile : 91, 97, 102, 106, 110 V.

Comportarea dinamică a traductorului este ilustrată de oscilogramele din figura 6, care reprezintă tensiunile la intrare și ieșire din traductor, la o variație bruscă a tensiunii de intrare cu + 10% și respectiv cu − 10%. Se observă că valoarea constantei de timp a traductorului este de 0,24 s, ceea ce permite folosirea acestuia pentru studiul variațiilor uzuale ale

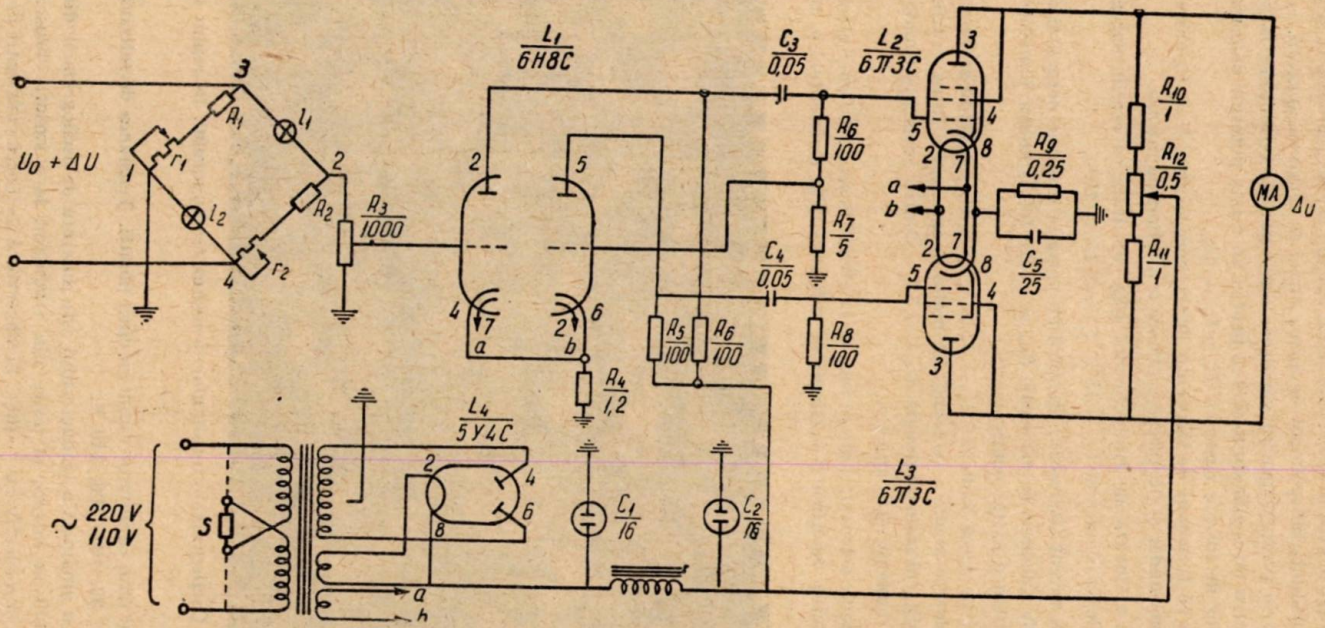


Fig. 7. — Schema de principiu a ansamblului amplificator de tensiune — amplificator de putere.

tensiunii în rețele, inclusiv pentru studiul fenomenului de flicker, în domeniul variațiilor de tensiune cu frecvențe de 0,5—5 Hz, domeniu în care acest fenomen este cel mai frecvent [10], [11]*).

Puterea la intrarea traductorului este de 10 VA, astfel încît poate fi conectat pe secundarul unui transformator de măsură.

Puterea la ieșirea traductorului este cca 2×10^{-3} VA; din această cauză el nu poate fi folosit decît cu aparate înregistratoare cu putere de intrare mică, cum sînt oscilografele. Acestea fiind incomode pentru studiul variațiilor uzuale de tensiune, s-a recurs la intercalarea unui amplificator de putere.

3. AMPLIFICATORUL DE TENSIUNE, AMPLIFICATORUL DE PUTERE ȘI ÎNREGISTRATORUL

Schema amplificatorului de tensiune este redată în figura 7. Acest amplificator a fost necesar pentru a obține o tensiune de regim optim pentru amplificatorul de putere. Amplificatorul cu un singur etaj, folosind o lampă 6H8C (L_1), are un coeficient de amplificare $\mu \approx 20$. Variațiile de tensiune de la ieșirea punții se colectează de pe potențiometrul R_3 și se transmit la grila lămpii L_1.

Ca amplificator de putere s-a folosit o schemă (fig. 7) în push-pull cu două lămpi 6П3С (L_2, L_3), care lucrează în clasa A. Curentul debitat la ieșirea amplificatorului de putere este proporțional cu tensiunea aplicată — adică, în domeniul de liniaritate al traductorului — cu abaterile valorii eficace a tensiunii aplicate la intrarea ansamblului.

Pentru înregistrare s-a folosit un înregistrator universal tip RFT. Prin reglarea potențiometrului R_3, valoarea variației de tensiune corespunzătoare maximului scalei aparatului înregistrator poate fi variată între $\pm1\%$ și $\pm12\%$.

În figura 8, sînt redate curbele de etalonare ale aparatului (incluzînd și înregistratorul), obținute prin compararea valorilor înregistrate cu indicațiile unui voltmetru de clasă 0,2.

Constanta de timp a înregistratorului este de cca. 1 s iar viteza maximă de derulare a hîrtiei de 180 mm/ore; aceasta îl face propriu pentru studiul variațiilor uzuale de tensiune, cu excepția celor foarte rapide, caracteristice fenomenului de flicker. În studiul variațiilor foarte rapide de tensiune, traductorul de abateri va fi folosit de aceea împreună cu un oscilograf sau un înregistrator cu constantă de timp foarte mică.

Ansamblul constructiv realizat (fig. 1) este simplu, ceea ce îl face apt pentru deplasări pe teren.

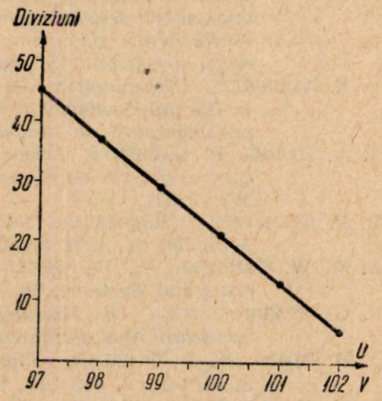


Fig. 8. — Caracteristicile de etalonare ale ansamblului.

CONCLUZII

În concluzie, față de diversitatea mărimilor și funcțiilor statistice în care intervin variațiile uzuale ale tensiunilor, în diferite probleme de cercetare, este necesar un aparat de

*) Întrucît în studiul flicker-ului, este necesară completarea instalației de prelucrare a datelor cu un filtru special, este posibilă completarea caracteristicii dinamice a înregistratorului prin dimensionarea adecvată a acestui filtru, lărgindu-se astfel domeniul de aplicare pînă la 25 Hz.

înregistrarea abaterilor de tensiune, ale cărui înregistrări să fie apoi prelucrate centralizat cu ajutorul unui calculator electronic. Aparatul descris satisface cerințele necesare acestor cercetări privind sensibilitatea, precizia, independența de forma undei de tensiune și constantele de timp.

BIBLIOGRAFIE

1. P. AILLERET, *L'introduction de la mesure dans la notion de la qualité du service d'une distribution d'électricité et son intérêt au point de vue de la conception des réseaux.* Bull. SFE 7e Série, **VI**, *61* (1956).
2. В. А. ВЕНИКОВ, Л. А. СОЛДАТКИН, *К вопросу о критериях качества электроэнергии и качества автоматического регулирования режима электросистем.* Электричество, *12*, 21—27 (1959).
3. P. GAUSSENS, P. CAZALET, *Le réglage de la tension dans les réseaux de distribution.* Bull. SFE, I—8e Série 7, 478—496 (1960).
4. * * * *Всесоюзная конференция по качеству напряжения и его регулированию в электрических сетях и системах.* Электричество, *6*, 89—92, 1962.
5. I. PARIZY, P. CAZALET, *Problèmes d'architecture et de construction des postes. II. Tendances nouvelles en matière de mesure et d'enregistrement.* CIGRE, Rap. *156* (1962).
6. E. ARIE, *Caracteristici nodale de putere ale sistemelor electroenergetice interconectate radial, în regim staționar.* St. cerc. energ., **XI**, *1* (1961).
7. — *Caractéristiques nodales de puissance et indices intégraux de qualité de la tension et de la fréquence.* Revue d'Electrotechnique et d'Energétique, **VI**, *2*, 307 (1961).
8. — *Studiu experimental al fluctuațiilor sarcinii cu aplicații la calculul fluctuațiilor puterii de schimb și la determinarea experimentală a caracteristicilor dinamice ale unui sistem electroenergetic.* St. cerc. energ., **XIII**, *1*, 33 (1963).
9. — *Caracteristici ale sistemelor electroenergetice pentru studiul calității reglajului frecvenței și tensiunii.* St. cerc. energ., **XIII**, *3* (1963).
10. P. AILLERET, *Détermination des lois expérimentales du papillottement (flicker) en vue de leur application aux réseaux à basse tension sur lesquelles des charges varient périodiquement ou aléatoirement.* Bull. SFE 7 Séries, **VII**, *77*, 257—262 (1957).
11. A. DEJOU, P. GAUSSENS, *Dispositifs expérimentaux pour l'étude du flicker. Résultats des mesures sur les réseaux à basse tension.* Bull. SFE, 7 Séries, **VII**, *77*, 263—272 (1957).
12. P. GAUSSENS, *Réglage des fluctuations de tension dans les réseaux électriques.* Bull. ASE, **50**, *26*, 1271 (1959).
13. M. W. GANGHEL, W. W. GREEN, *32-Step Voltage-regulator performance.* Power Apparatus and Systems, **56**, 559 (1961).
14. G. MEYER-BRÖTZ, *Die Messung von Kenngrössen stochastischer Prozesse mit den elektronischen Analogrechnern.* Elektronische Rechenanlagen, *3*, 103 (1962).
15. B. BLÄSS, K. J. MOELLER, *Spannungsmesser mit unterdrücktem Anfangsbereich.* ATM-J. 015—9, J. 015—10, febr., 43, iunie, 133.
16. H. HALKE, *Genaue Messung sehr kleiner Wechselspannungsänderungen.* ATM, oct., *285*, 203 (1959).
17. E. ARIE, C. GUTU, M. PETCU, *Incidența continuității serviciului și rigidității parametrilor energiei electrice în problema dimensionării rezervei de putere.* St. cerc. energ., **XIII**, *4* (1963).

А. И. ВАЖНОВ, *Основы теории переходных процессов синхронной машины* (Bazele teoriei proceselor tranzitorii în maşina sincronă).

Гос. энерг. изд., Москва—Ленинград, 1960, 312 p.

Problema proceselor tranzitorii în maşina sincronă constituie una din temele fundamentale ale cercetării în domeniul maşinilor electrice. Acestei probleme îi este dedicată lucrarea prezentată, prin care autorul aduce o contribuţie însemnată la dezvoltarea studiului proceselor tranzitorii în maşina sincronă. Meritorie rămîne pentru autor, în realizarea acestui studiu, depăşirea unor greutăţi ridicate de neuniformitatea lucrărilor sintetizate, diferiţii autori abordînd în mod diferit metodicile de cercetare, notarea parametrilor, alegerea mărimilor de bază în cadrul sistemului de unităţi relative, alegerea sistemului de coordonate etc.

Prin prezentarea unitară a unui material extrem de vast, prin tratarea amănunţită a diverselor aspecte ale proceselor permiţînd înţelegerea sensului lor fizic, prin completarea cercetărilor teoretice, lucrarea se adresează în egală măsură specialiştilor în domeniul maşinilor electrice, cercetătorilor, inginerilor din exploatare, studenţilor etc.

Cercetarea proceselor tranzitorii în maşina sincronă s-a realizat apelîndu-se la transformarea sistemului de coordonate, mărimile complexe şi la schema echivalentă corespunzătoare diferitelor regimuri de funcţionare.

Expunerea începe prin prezentarea în mod succint a cunoştinţelor generale despre sistemul magnetic şi bobinaje, cu tratarea problemelor constructive ale maşinii sincrone şi despre cîmpurile magnetice şi f.e.m.; se fac unele consideraţii asupra distribuţiei cîmpurilor magnetice create de curenţii înfăşurărilor inductoare, de amortizare şi induse, precum şi asupra armonicilor acestora.

Sînt prezentate apoi ecuaţiile diferenţiale ale maşinii sincrone, transformările liniare şi sistemul unităţilor relative, elemente de bază în studiul proceselor tranzitorii. Avînd în vedere importanţa lor, autorul le acordă o atenţie deosebită, această parte distingîndu-se printr-o claritate desăvîrşită.

Transformările liniare aplicate ecuaţiilor diferenţiale Park-Gorev, cu coeficienţi variabili, sînt tratate multilateral, analizîndu-se amănunţit trecerea de la sistemul fizic de trei axe (a, b, c) la sistemul de două axe (x, y), acesta la rîndul său luat în diferite variante :

— sistemul α, β imobil faţă de stator,

— sistemul d, q imobil faţă de rotor,

— sistemul x, y rotindu-se cu viteza sincronă.

În cadrul acestor transformări, autorul insistă în mod special asupra expresiilor inductivităţilor, exprimarea lor corectă reprezentînd una din dificultăţile studiului proceselor tranzitorii din maşina sincronă.

Utilizarea unui sistem de unităţi relative uşurează descrierea proceselor şi simplifică ecuaţiile caracteristice.

Autorul semnalează dificultăţile apărute în stabilirea unui sistem de unităţi relative unanim acceptat şi recomandă sistemul, mai jos utilizat, introdus de Park.

În capitolul următor se tratează problema curenţilor de scurtcircuit în cazul maşinii sincrone fără înfăşurare de amortizare. Determinarea curenţilor de scurtcircuit prezintă o însemnătate deosebită întrucît permite proiectarea corespunzătoare a întrerupătoarelor de deconectare a liniilor, reglarea releelor de protecţie şi luarea măsurilor de întărire a capetelor de bobină în maşina puternic solicitată la eforturi mecanice.

Se analizează curenţii de scurtcircuit mono-, bi- şi trifazat, deosebirile calitative dintre aceştia şi urmările lor : apariţia supratensiunilor, armonicilor, momentelor alternative şi a regimurilor instabile.

Urmează analiza ecuaţiilor maşinii sincrone prevăzută cu înfăşurare de amortizare pentru care se determină curenţii de scurtcircuit.

În cercetarea fenomenelor se aplică ecuaţiile operaţionale care prezintă interes nu numai pentru rezolvarea rapidă a problemelor practice dar şi pentru cercetarea parametrilor maşinii, pentru crearea schemelor echivalente şi analiza multilaterală a proceselor tranzitorii.

În continuare se trece la analiza completă a proceselor tranzitorii în maşina sincronă prin considerarea şi rezolvarea pentru diferitele regimuri posibile a sistemului de ecuaţii diferenţiale ce cuprinde ecuaţiile tensiunilor şi cuplurilor maşinii sincrone. Funcţie de tensiuni şi parametrii de bază ai maşinii se deduc expresiile cuplului şi componentele sale în regim simetric staţionar şi în timpul scurtcircuitului trifazat fără şi cu luarea în considerare a rezistenţelor circuitelor induse şi inductoare. Autorul tratează pe larg şi probleme mai speciale cum ar fi cuplul electromagnetic în cazul micilor oscilaţii stabile ale rotorului, regim provocat de cupluri mecanice la arbore pulsatorii, în cazul funcţionării în asincron la alunecarea dată cu înfăşurarea de excitaţie deschisă sau scurtcircuitată şi în cazul unor perturbaţii bruşte ale regimului staţionar de funcţionare.

Problemele de stabilitate statică a maşinii sincrone sînt tratate pentru diverse regimuri particulare după o prezentare succintă a metodicii generale de cercetare a stabilităţii statice pe baza teoriei micilor perturbaţii. Se urmăreşte caracterul şi posibilităţile pierderii stabilităţii statice a maşinii fără şi cu poli aparenţi, fără înfăşurarea de amortizare în situaţii cînd se poate neglija rezistenţa circuitelor ce intervin în consideraţie. Considerăm ca bună metoda de expunere adoptată care, pe lîngă relaţiile de bază, prezintă în paralel procesele fizice ce au loc în maşină şi limitele în care sînt permise anumite simplificări ale soluţiilor.

Stabilitatea statică a maşinii sincrone cu reglajul fără inerţie şi fără zonă de insensibilitate al excitaţiei se urmăreşte pe baza analizei coeficienţilor ecuaţiei caracteristice pentru diferite legi de reglaj proporţional şi după diverşi parametri — curentul statorului, tensiunea la borne sau în alt punct al sistemului, unghi, — în situaţii ce permit funcţionarea maşinii sincrone în zona stabilităţii artificiale pînă la cuplul electromagnetic maxim obţinut pentru tensiunea electromotoare tranzitorie constantă (E'_d= const.). Curbele reproduse ilustrează în plus influenţa valorii diverşilor parametri fizici şi coeficienţi asupra mărimii zonei de stabilitate statică în general şi asupra unghiului intern corespunzător regimului limită. Capitolul respectiv reprezintă o frumoasă introducere în stadiul modern şi actual al stabilităţii statice a generatoarelor sincrone ce funcţionează la linii lungi sau foarte încărcate.

Problemele de stabilitate dinamică sînt mai succint tratate, fiind expuse numai metodica de cercetare, respectiv criteriul suprafeţelor de accelerare şi frînare egale la limită în aceste regimuri, cazurile posibile de stabilitate şi de pierdere a stabilităţii şi ilustrativ influenţa reglajului excitaţiei maşinii sincrone asupra stabilităţii dinamice.

Pe baza analizei ecuaţiilor diferenţiale în complex ale tensiunilor sînt prezentate schemele echivalente ale maşinii sincrone în regim permanent, pentru procesele tranzitorii corespunză-

toare regimurilor de scurtcircuit simetrice și nesimetrice, pentru oscilații mici periodice ale rotorului, pentru funcționarea în asincron la alunecare constantă. În plus, se prezintă și schemele echivalente clasice simplificate și exacte pentru diferiți parametri ai mașinii sincrone specifice anumitor regimuri.

Cazurile relativ tot mai frecvente ale prezenței condensatoarelor în circuitele indusului sînt analizate pentru determinarea condițiilor declanșării procesului de autoexcitație pe baza relațiilor între parametrii schemei, respectiv pe baza analizei ecuației caracteristice a sistemului în cazul simetriei circuitelor inductorului (regim sincron) și al funcționării în regim asincron cu viteză constantă.

În ultima parte a cărții se prezintă ecuațiile fundamentale și relațiile de calcul determinate sau utilizate în capitolele anterioare, transformările liniare, ecuațiile mașinii sincrone cu variabile cu dimensiuni fizice și adimensionale, sistemele de unități relative folosite în teoriile mașinilor sincrone (după Gorev și Park), reactanțele operaționale pe cele două axe și conductanța operațională; sînt prezentate de asemenea relațiile curenților și tensiunilor mașinii sincrone în diferite regimuri de scurtcircuit. Ar fi fost bine dacă cel puțin în această parte s-ar fi apelat la scrierea matricială a relațiilor, scriere frecvent întîlnită în cărțile de specialitate.

Bibliografia anexată, bine selecționată și sistematizată, constituie un ajutor prețios în îndrumarea celor ce se inițiază în problemele speciale și moderne ale analizei proceselor tranzitorii ale mașinilor sincrone.

Dată fiind destinația cărții, ar fi fost indicat ca pentru fiecare capitol să fi fost anexate cîteva exemple de calcul și deoarece în momentul de față mașinile de calcul electronice, cifrice și analogice, sînt mult utilizate în rezolvarea complexelor probleme urmărite de autor, soluțiile problemelor să fi fost aduse în mod special în faza de a putea fi introduse direct pe mașinile de calcul. În acest sens era deosebit de utilă o schemă echivalentă completă a mașinii sincrone care să poată fi realizată pe mașinile analogice pentru urmărirea sistematică și complexă a diferitelor regimuri și procese din mașina sincronă.

În general, materialul este clar expus, bine sistematizat, urmărește atît deducerea ecuațiilor cît și prezentarea tabloului complex al înlănțuirii proceselor electromagnetice și dinamice din mașină. Cartea constituie un prețios îndrumar în studiul problemelor speciale ale acestui domeniu. Dat fiind calitățile semnalate cît și faptul că în limba română nu există nici o carte de acest profil, considerăm foarte utilă traducerea ei.

D. Crețu și *P. Oprișan*

K. H. STURM, *Vorschalgeräte und Schaltungen für Niederspannungs-Entladungslampen* (Aparate de preconectare și scheme pentru lămpile cu descărcări în gaze de joasă tensiune).

Mandheim, 1963, 400 p.

Lucrarea prezintă cele mai moderne realizări ale tehnicii în domeniul iluminatului fluorescent.

Începînd cu o sumară trecere în revistă a mărimilor fotometrice, se prezintă o clasificare a lămpilor cu descărcări cu gaze de joasă tensiune.

Urmează prezentarea lămpilor fluorescente cu descărcări în vapori de mercur de joasă presiune, arătîndu-se unele aspecte fizice privind funcționarea, încărcarea cu gaze, date pri-

vind pulberea fluorescentă fotocolorimetrică, detalii constructive și date tehnice electrice pentru diverse tipuri fabricate de mai multe firme.

Se studiază apoi dependența duratei de funcționare de modul de aprindere, de condițiile de utilizare, de temperatură etc.

Într-un nou capitol se trec în revistă principalele tipuri de startere ca acelea cu preîncălzire, cu descărcare în gaze, în bimetal, electromagnetice, termomagnetice, dîndu-se numeroase date tehnice funcționale și constructive, diagrame precum și scheme electrice de principiu.

În capitolul rezervat balasturilor, se arată mai întîi necesitatea fizică a limitării curentului în tubul cu descărcări în gaze, metodele de compensare a puterii reactive consumate de balasturile inductive, diverse tipuri constructive de balasturi, dintre care reținem balasturile speciale folosite în rețele cu variații de tensiune și frecvență. Se mai discută norme de fabricație și control, balasturile pentru curent continuu etc.

Se pregătește apoi un studiu sumar al posibilităților de variere a intensității fluxului luminos debitat de lampa fluorescentă cu ajutorul metodelor magnetice și electronice.

În capitolul rezervat instalării lămpilor fluorescente se fac precizări asupra condițiilor impuse rețelei, asupra posibilităților de compensare a puterii reactive cerută de ansamblul lampă-balast folosind montaje speciale. De asemenea, se precizează metode de depistare a defectelor în instalațiile cu tuburi fluorescente precum și măsurătorile curente ce se efectuează asupra lămpilor, balasturilor și starterelor.

Un capitol separat se ocupă de instalațiile pentru iluminat fluorescent în vagoane de cale ferată.

În partea a 2-a a lucrării se prezintă lămpile cu descărcări în vapori de mercur de înaltă presiune și lămpile cu descărcare în vapori de sodiu de înaltă presiune, împreună cu aparatajul de preconectare corespunzător, după același plan ca și cel folosit la descrierea aparatajului pentru lămpile fluorescente obișnuite și tratînd aceleași probleme. Ultima parte a lucrării se referă la lămpi fluorescente pentru scopuri speciale, lămpi cu radiații ultraviolete pentru sterilizare, lămpi pentru heliografe precum și problema antiparazitării instalațiilor ce cuprind lămpi fluorescente.

În încheiere, se dau indicații privind amplasarea corpurilor de iluminat pentru iluminatul interior și exterior precum și considerații asupra rentabilității iluminatului fluorescent în diferite situații concrete.

Adresîndu-se electrotehnicienilor care se ocupă de tehnica iluminatului fluorescent, pune la dispoziție un bogat material atît pentru documentare privind cele mai noi soluții tehnice, scheme și dispozitive cît și pentru proiectare.

Lucrarea cuprinde numeroase grafice, fotografii scheme electrice precum și tabele cu date tehnice și este lipsită de deducții matematice greoaie, astfel că ea poate fi folosită cu succes și de inginerii și tehnicienii fără o pregătire matematică specială.

Cu toate că materialul prezentat este cu deosebire orientat spre partea electrotehnică a elementelor și instalațiilor, totuși se scoate în evidență suficient și latura de tehnica iluminatului și consecințele tehnico-economice, astfel că proiectanții găsesc în carte un prețios ajutor pentru proiectarea unor instalații mari cu lumină fluorescentă.

Prin conținutul ei foarte variat ca tematică, cuprinzînd aproape toate problemele actuale ale tehnicii iluminatului fluorescent, precum și prin forma atractivă de prezentare, sîntem convinși că volumul va fi de un real folos inginerilor și tehnicienilor ce se ocupă de problema iluminatului fluorescent.

Bujor Avramescu

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Seria A

ENERGETICĂ GENERALĂ ŞI ELECTROENERGETICĂ

Tomul XIII 1963

INDEX ALFABETIC

	Nr.	Pag.
Energetică generală		
V. CARACUDOVICI, S. MANEA, CS. NAGY şi G. PANAITESCU, Consideraţii asupra consumului casnic de energie electrică pentru iluminat	1	3
V. CARACUDOVICI, CS. NAGY, Contribuţii asupra metodelor pentru predeterminarea consumului de energie în sectorul casnic	2	213
V. CARACUDOVICI, J. GAYRAUD, N. MOLDOVEANU şi CS. NAGY, Contribuţii la sistematizarea indicatorilor de consum specific de energie	4	453
M. ELEFTERESCU, ŞT. KOVÁCS şi GH. TRANDAFIRESCU, Consideraţii asupra sistemelor de transport de combustibil şi energie electrică	2	175
M. ELEFTERESCU, ŞT. KOVÁCS şi GH. TRANDAFIRESCU, Aspecte ale cooperării diverselor sisteme de transport de combustibil	3	353
C. GUŢU, I. IORDACHE şi A. SOCI, Consecinţele economice ale întreruperilor electrice în procesele siderurgice	2	191
C. GUŢU, M. PETCU şi A. SOCI, Determinarea efectului economic al variaţiilor de tensiune asupra consumatorilor	4	511
CS. NAGY şi V. CARACUDOVICI, Probleme ridicate de necesitatea dezvoltării continue a bazei energetice	3	337
CS. NAGY şi S. MANEA, Consideraţii asupra caracterului corelaţiilor consumului de energie în industrie	4	473
T. MICLESCU, Exprimarea regimului de consum şi de producere a energiei şi purtătorilor de energie în ecuaţiile bilanţului energetic general	2	183
Electroenergetică şi electrotehnică		
C. APETREI, C. BĂLĂ, N. ŞTEFĂNESCU şi I. BAHRIN, Calculul forţelor axiale la autotransformatorul de reglaj	2	221
ECATERINA ARIE, Studiul experimental al fluctuaţiilor sarcinii cu aplicaţii la calculul fluctuaţiilor puterii de schimb şi de determinarea experimentală a caracteristicilor dinamice ale unui sistem electroenergetic	1	33

	Nr.	Pag.
E. ARIE, P. NICOLAE şi H. CRISTEA, Compensarea regimului deformant la instalaţii de redresare echipate cu baterii de condensatoare. II. Principii de alegere a parametrilor instalaţiilor de filtrare a armonicilor	2	259
E. ARIE, Caracteristici ale sistemelor electroenergetice pentru calculul indicilor de calitate ai reglajului frecvenţei şi tensiunii	3	425
C. BĂLĂ şi A. GH. CUPŞA, Determinarea optimului tehnico-economic absolut în proiectarea transformatoarelor de putere	1	107
C. BĂLĂ, M. POMÎRLEANU şi M. BÎRGĂUANU, Compensarea regimului deformant la instalaţii de redresare echipate cu baterii de condensatoare. I. Efectele armonicilor şi mijloace pentru diminuarea lor	2	245
M. BÎRGĂUANU, D. CREŢU şi C. BĂLĂ, Cu privire la determinarea soluţiilor optime ale unei serii unitare de transformatoare de putere pe bază de considerente tehnice şi economice	1	125
M. BÎRGĂUANU şi D. CREŢU, Caracteristicile şi dimensiunile principale ale seriei de transformatoare de putere de 100—1 600 kVA determinate de condiţii tehnico-economice	4	583
D. COSTINA, M. BALÁSZ şi V. STANCIU, Studii privind problema reducerii nivelului de izolaţie al echipamentului staţiilor de 110 V	1	141
D. CREŢU, M. BÎRGĂUANU şi P. OPRIŞAN, Influenţa variaţiilor indicilor tehnico-economici asupra soluţiei optime a transformatoarelor de putere	1	73
PAUL DIMO, Conceptele şi procedeele „analizei nodale" asociată calculatorului numeric	3	389
PAUL DIMO, Soluţia problemei pierderilor în reţelele electrice cu ajutorul echivalentului REI a „analizei nodale" asociat unui calculator numeric	4	523
F. MANEA, S. IONESCU şi P. NICOLAE, Studiul optimizării reglajului automat al frecvenţei şi puterilor în sistemele energetice cu ajutorul unui calculator analogic	1	51
M. MARINESCU, Asupra unei generalizări a noţiunii de rezonanţă şi aplicarea ei la dezvoltarea unei noi tehnici de producere a ultrasunetelor . .	1	33
M. MARINESCU, Studiul încărcării cu sarcina aperiodică a motoarelor cu histerezis electromecanice	2	235
AUGUSTIN MORARU, Contribuţii la teoria motorului asincron cu cilindru de etanşare în întrefier	3	377
V. M. POPOV, Hiperstabilitatea sistemelor automate cu mai multe elemente neliniare	2	279
V. M. POPOV, N. N. TĂTARU şi T. M. BĂJENESCU, Calculatorul analogic neliniar MECAN-II-	2	291
R. RĂDULEŢ şi C. MOCANU, Efectele de margine şi proximitate în barele cu secţiune dreptunghiulară la refulare netă a curentului electric . .	4	543

Note

I. ADĂMUŢ, Analiza unui sistem de vectori polifazat cu ajutorul abaterilor de la simetrie	2	319
E. ARIE şi H. CRISTEA, Măsurarea abaterilor de tensiune în reţele electrice	4	—
M. BÎRGĂUANU şi D. CREŢU, Transformatoare cu cupru sau aluminiu . .	2	309
M. POMÎRLEANU şi E. ARIE, O metodă de calcul al impedanţelor de transfer ale unei reţele electrice utilizînd maşinile electronice analogice . .	2	299

Recenzii

АКАДЕМИЯ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

ТРУДЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ по ЭНЕРГЕТИКЕ

Серия А

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Том XIII 1963

MŰSZAKI EGYETEM

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

	№	Стр
Общая энергетика		
К. ГУЦУ, И. ИОРДАКЕ и А. СОЧЬ, Экономические последствия перерывов в подаче электроэнергии на предприятиях черной металлургии	2	191
К. ГУЦУ, М. ПЕТКУ и А. СОЧЬ, Определение экономического эффекта изменений напряжения на потребителей	4	511
В. КАРАКУДОВИЧ, С. МАНЯ, Ч. НАГЬ и Т. ПАНАИТЕСКУ, Бытовой расход электроэнергии на освещение в РНР	1	3
В. КАРАКУДОВИЧ и Ч. НАГЬ, О методах предварительного определения потребления энергии в бытовом секторе	2	213
В. КАРАКУДОВИЧ, И. ГЭЙРО, Н. МОЛДОВЯНУ и Ч. НАГЬ, К вопросу о систематизации показателей удельного расхода энергии	4	453
Ч. НАГЬ и В. КАРАКУДОВИЧ, Вопросы, возникающие в связи с необходимостью неуклонного развития энергетической базы	3	337
Ч. НАГЬ и С. МАНЯ, Некоторые соображения относительно соотношений потребления энергии в промышленности	4	473
Т. МИКЛЕСКУ, Выражение режима потребления и выработки энергии и энергоносителей в уравнениях общего энергетического баланса	2	183
М. ЭЛЕФТЕРЕСКУ, Ш. КОВАЧ и Г. ТРАНДАФИРЕСКУ, О системах транспорта топлива и передача электроэнергии	2	175
М. ЭЛЕФТЕРЕСКУ, Ш. КОВАЧ, и Г. ТРАНДАФИРЕСКУ, Аспекты сопоставления различных систем транспортировки топлива	3	353
Электроэнергетика и электротехника		
К. АПЕТРЕЙ, К. БЭЛЭ, Н. ШТЕФЭНЕСКУ и И. БАХРИН, Расчет аксиальных сил в регулировочном автотрансформаторе	2	221
Е. АРИЕ, Опытное исследование флуктуации нагрузки и применение его в расчете изменений сменной нагрузки и в опытном определении динамической характеристики некоторой энергетической системы	1	33

	№	Стр.
Е. АРИЕ, П. НИКОЛАЕ и Х. КРИСТЯ, Компенсация деформирующего режима в выпрямительных установках, оборудованных конденсаторными батареями	2	259
Е. АРИЕ, Характеристики электроэнергетических систем для расчета качественных показателей регулировки частоты и напряжения	3	425
М. Е. БЫРГЭУАНУ, Д. В. КРЕЦУ и К. В. БЭЛЭ, Относительно оптимального определения решения серии силовых трансформаторов на основании технических и экономических соображениий	1	125
М. БЫРГЭУАНУ и Д. КРЕЦУ, Основные характеристики и размеры серии трансформаторов мощностью в 100—1 600 ква, определяемые технико-экономическими условиями	4	583
К. В. БЭЛЭ и А. Г. КУПША, Определение абсолютно-экономического оптимума при проектировании силовых трансформаторов	1	107
К. БЭЛЭ, М. ПОМЫРЛЯНУ и М. БЭРГЭУАНУ, Компенсация деформирующего режима в выпрямительных установках, оборудованных конденсаторными батареями	2	245
П. ДИМО, Основы и методы «узлового анализа» в сочетании с цифровой вычислительной машиной	3	389
ПАУЛ ДИМО, Решение задачи потерь в электрических сетях при помощи эквивалента РЭИ «узлового анализа», ассоциированного с цифровой вычислительной машиной	4	523
Д. КОСТИНА, Б. МАТЕЙ и В. СТАНЧИУ, Изучение вопроса уменьшения степени изоляции оборудования трансформаторных подстанций мощностью в 110 в	1	141
Д. КРЕЦУ, М. БЫРГЭУАНУ и П. ОПРИШАН, Влияние изменения технико-экономических показателей на оптимальное решение силовых трансформаторов	1	73
Ф. МАНЯ, С. ИОНЕСКУ и П. НИКОЛАЕ, Изучение оптимизации автоматического регулирования частоты и мощностей в энергетических системах при помощи аналогового вычислителя	1	51
М. МАРИНЕСКУ, Изучение приложения апериодической нагрузки к двигателям с электромеханическим гистерезисом	2	235
М. МАРИНЕСКУ, К обобщению понятия о резонансе и его применение в развитии новой техники генерации ультразвуков	1	17
АВГУСТИН МОРАРУ, К теории асинхронного двигателя с уплотняющим цилиндром в воздушном зазоре	3	377
В. М. ПОПОВ, Гиперустойчивость автоматических систем с несколькими нелинейными элементами	2	279
В. М. ПОПОВ, Н. Н. ТЭТАРУ и Т. М. БЭЖЭНЕСКУ, Аналоговая вычислительная нелинейная машина «Мекан—II»	2	291
Р. РЭДУЛЕЦ и К. МОКАНУ, Краевые и близостные эффекты в шинах прямоугольного сечения при чистом рефулировании электрического тока	4	543

Заметки

Рецензии